

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# Надійність електроенергетичних систем

## Практикум

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для студентів, які навчаються за спеціальністю  
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2020

Надійність електроенергетичних систем: Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: С.В. Казанський. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 67 с.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 27.02.2020 р.) за поданням Вченої ради факультету електроенергетичної та автоматики (протокол № 7 від 24.02.2020 р.)

Електронне мережне навчальне видання

# НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

## ПРАКТИКУМ

Укладач: *Казанський Сергій Володимирович*, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний редактор: *Кацадзе Теймураз Луарсабович*, канд. техн. наук, доц.

Рецензент: *Бардик Євген Іванович*, канд. техн. наук, доц.

*За редакцією укладача*

Даний електронний ресурс містить завдання та допоміжні матеріали для виконання модульних та домашніх контрольних робіт з дисципліни «Надійність електроенергетичних систем» студентами спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньої програми «Електричні системи і мережі».

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Терміни та визначення.....	5
1.1 Термінологічна система основних понять.....	5
1.2 Основні показники безвідмовності об'єктів.....	18
1.3 Показники довговічності та ремонтності.....	20
1.4 Комплексні показники надійності.....	21
Запитання для самоперевірки.....	23
2 Контрольна робота № 1. Визначення показників надійності об'єктів, які складаються з невідновлюваних резервованих елементів.....	24
2.1 Основні теоретичні відомості та розрахункові співвідношення.....	24
2.2 Зміст контрольної роботи № 1 та приклад розрахунку.....	27
Запитання для самоперевірки.....	35
3 Контрольна робота № 2. Визначення показників надійності об'єктів, які складаються з відновлюваних нерезервованих елементів.....	36
3.1 Основні теоретичні відомості та розрахункові співвідношення.....	36
3.2 Зміст контрольної роботи № 2 та приклад розрахунку.....	37
Запитання для самоперевірки.....	41
4 Контрольна робота № 3. Визначення показників надійності складних схем електричних з'єднань.....	42
4.1 Основні теоретичні відомості та розрахункові співвідношення.....	42
4.2 Зміст контрольної роботи № 3 та приклад розрахунку.....	45
Запитання для самоперевірки.....	56
5 Контрольна робота № 4. Непараметричне визначення надійності систем електропостачання.....	57
5.1 Основні теоретичні відомості та розрахункові співвідношення.....	57
5.2 Зміст контрольної роботи № 4 та приклад розрахунку.....	61
Запитання для самоперевірки.....	66
Список рекомендованої літератури.....	67

## ВСТУП

Навчальним планом здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньо-професійної програми «Електричні системи і мережі» передбачається виконання модульних та домашніх контрольних робіт з дисципліни «Надійність електроенергетичних систем».

Дисципліна «Надійність електроенергетичних систем» складається з двох кредитних модулів, належить до циклу професійної підготовки бакалаврів та має на меті набуття знань з технології експлуатації електрообладнання з метою вирішення завдання підвищення надійності функціонування електроенергетичних систем і електричних мереж.

**Мета виконання модульних та домашніх контрольних робіт** – закріплення теоретичних знань та основ методології аналізу надійності обладнання електроенергетичних систем і мереж на стадії проектування та в процесі експлуатації, що є обов'язковим елементом підготовки сучасного інженера-електротехніка. Виконання контрольних робіт сприятиме набуттю студентами певного досвіду прийняття самостійних рішень щодо підвищення надійності роботи електрообладнання.

Практикум містить матеріали для виконання чотирьох контрольних робіт, кожна з яких містить короткі теоретичні відомості, що сприяє ефективному сприйняттю та закріпленню теоретичного матеріалу при виконанні поставлених завдань. Для кожної роботи наведено докладні приклади розрахунку, а також запитання для самоперевірки.

# 1 ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

## 1.1 Термінологічна система основних понять

*Об'єкт* (англ. *item*) – система, споруда, машина, підсистема, апаратура, функціональна одиниця, пристрій, елемент чи будь-яка їх частина, що розглядається з погляду надійності як самостійна одиниця.

*Надійність* (англ. *dependability*) – властивість об'єкта зберігати у часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування.

*Аналіз надійності* (англ. *dependability analysis*) – систематизоване дослідження з метою визначення впливу на надійність об'єкта особливостей конструкції, технологічних процесів виробництва, умов експлуатації, технічного обслуговування та ремонту, а також визначення досягнутого рівня надійності при виконанні запланованих заходів щодо забезпечення і підвищення надійності та оцінка ефективності цих заходів.

*Проектне оцінювання надійності* (англ. *projected estimatic dependability*) – визначення сподіваних числових значень показників надійності проектного об'єкта на підставі даних про надійність його складових частин і структури об'єкта.

*Елемент* – технічний пристрій, що не призначений для самостійного застосування, але використовується для створення систем і виконує в системі визначені функції.

*Система* – сукупність спільно діючих елементів, призначена для самостійного виконання заданих функцій.

Поняття елемента і системи трансформуються залежно від поставленого завдання. Наприклад, силовий трансформатор, при встановленні його власної надійності розглядається як система, що складається з окремих елементів – механізмів, деталей і т.п., а при визначенні надійності, наприклад, підстанції, на якій цей трансформатор встановлений – як елемент.

*Електроустановка* – комплекс взаємопов’язаних устаткування і споруд, призначених для виробництва, перетворення, передавання, розподілу чи споживання електричної енергії.

*Система електроенергетична* (англ. *electrical power system*) – сукупність електрообладнання енергетичної системи та об’єднаних загальним режимом споживачів електричної енергії, які становлять єдине ціле.

*Електростанція* (англ. *power station*) – енергоустановка, призначена для виробництва електричної енергії чи електричної енергії та тепла, що містить будівельну частину обладнання та необхідне допоміжне обладнання.

*Електрична мережа* (англ. *electrical power network*) – сукупність підстанцій, розподільних установок та електричних ліній, призначена для передавання та розподілення електричної енергії.

*Електрична підстанція* (англ. *substation of a power system*) – електроустановка, призначена для приймання, перетворювання та розподілення електричної енергії, складена з трансформаторів чи інших перетворювачів електричної енергії, розподільних та керувальних установок і допоміжних пристроїв.

*Лінія електропередавання* – електрична лінія, яка виходить за межі електростанції чи підстанції і призначена для передавання електричної енергії на відстань.

Надійність об’єкта характеризується наступними основними станами і подіями.

*Справність* (англ. *good state*) – стан об’єкта, за яким він здатний виконувати усі задані функції об’єкта.

*Несправність* (англ. *fault*) – стан об’єкта, за яким він нездатний виконувати хоч би одну із заданих функцій об’єкта.

*Аналіз несправностей* (англ. *fault analysis*) – логічне та систематичне дослідження об’єкта для ідентифікації та аналізу ймовірностей виникнення, причин та наслідків потенційних несправностей.

*Працездатний стан* (англ. *up state*) – стан об'єкта, який характеризується його здатністю виконувати усі потрібні функції.

*Непрацездатний стан* (англ. *down state*) – стан об'єкта, за яким він нездатний виконувати хоч би одну з потрібних функцій.

Поняття *справність* ширше, ніж поняття *працездатність*. Працездатний об'єкт зобов'язаний задовольняти лише тим вимогам нормативно-технічної документації, виконання яких забезпечує нормальне застосування об'єкта за призначенням. Таким чином, якщо об'єкт непрацездатний, то це свідчить про його несправність. З іншого боку, якщо об'єкт несправний, то це ще не означає, що він непрацездатний.

*Незначна несправність* (англ. *minor fault*) – несправність, що не порушує жодної з потрібних функцій об'єкта.

*Значна несправність* (англ. *major fault*) – несправність, що порушує хоча б одну з потрібних функцій об'єкта.

*Повна несправність* (англ. *function-preventing fault*) – несправність, що характеризується повною нездатністю об'єкта виконувати усі потрібні функції.

За причинами, що призвели до несправності, остання підрозділяється на:

- несправність через перевантаження (англ. *misuse fault*);
- несправність через невміле поводження (англ. *mishandling fault*);
- несправність через неміцність (англ. *weakness fault*);
- несправність через зношування та (чи) старіння (англ. *ageing fault*);
- конструкційну несправність (англ. *design fault*);
- виробничу несправність (англ. *manufacuring fault*);
- стабільну несправність (англ. *permanent fault*);
- приховану несправність (англ. *latent fault*);
- масковану несправність (англ. *fault masking*).

*Дефект (англ. defect)* – кожна окрема невідповідність об'єкта встановленим вимогам.

*Пошкодження (англ. damage)* – подія, яка полягає у порушенні справного стану об'єкта, коли зберігається його працездатність.

*Граничний стан* – стан об'єкту, при якому його застосування за призначенням неприпустимо або недоцільно.

Застосування (використання) об'єкта за призначенням припиняється в наступних випадках:

- при неусувному порушенні безпеки;
- при неусувному відхиленні величин заданих параметрів;
- при неприпустимому збільшенні експлуатаційних витрат.

Для деяких об'єктів граничний стан є останнім в його функціонуванні, тобто об'єкт знімається з експлуатації, для інших – певною фазою в експлуатаційному графіку, що вимагає проведення ремонтно-відновних робіт.

У зв'язку з цим об'єкти можуть бути відновлюваними або невідновлюваними.

*Відновлюваний об'єкт (англ. restorable item)* – ремонтний об'єкт, який після відмови та усунення несправності знову стає здатним виконувати потрібні функції з заданими кількісними показниками надійності.

*Невідновлюваний об'єкт (англ. non-repaired item)* – об'єкт, ремонт якого неможливий чи не дозволяє відновити працездатність із заданими кількісними показниками надійності.

До невідновлюваних об'єктів можна віднести, наприклад, розрядники, скляні чи фарфорові ізолятори, плавкі вставки запобіжників тощо. Об'єкти, що складаються з багатьох елементів, наприклад, трансформатор або лінія електропередачі, є відновлюваними, оскільки їх відмови пов'язані з пошкодженнями одного або декількох елементів, які можуть бути замінені впродовж певного проміжку часу.

У ряді випадків один і той самий об'єкт залежно від особливостей, етапів експлуатації або призначення може вважатися відновлюваним або невідновлюваним. При цьому невідновлюваний об'єкт може бути як ремонтним, так і неремонтним.



*Ремонтовний об'єкт* (англ. *repairable item*) – об'єкт, ремонт якого можливий та передбачений нормативною, ремонтною та (чи) конструкторською (проектною) документацією.

*Неремонтовний об'єкт* (англ. *nonrepairable item*) – об'єкт, ремонт якого неможливий чи непередбачений нормативною, ремонтною та (чи) конструкторською (проектною) документацією.

*Обслуговуваний об'єкт* (англ. *maintainable item*) – об'єкт, для якого проведення технічного обслуговування передбачено нормативно-технічною документацією та (чи) конструкторською (проектною) документацією.

*Необслуговуваний об'єкт* (англ. *nonmaintainable item*) – об'єкт, для якого проведення технічного обслуговування не передбачено нормативно-технічною документацією та (чи) конструкторською (проектною) документацією.

*Відмова* (англ. *failure*) – подія, яка полягає у втраті об'єктом здатності виконувати потрібну функцію, тобто у порушенні працездатного стану об'єкта.

При цьому відмова є подія, на відміну від *несправності*, що є станом та причиною відмови.

Відмова, як подія, має такі різновиди:

- повна відмова (англ. *complete failure*);
- часткова відмова (англ. *partial failure*);
- ресурсна відмова (англ. *marginal failure*);
- критична відмова (англ. *critical failure*);
- конструкційна відмова (англ. *design failure*);
- виробнича відмова (англ. *manufacturing failure*);
- систематична відмова (англ. *systematic failure*);
- відмова через перевантаження (англ. *misuse failure*);
- відмова через неправильне поводження (англ. *mishandling failure*);
- відмова через неміцність (англ. *weakness failure*);

- деградована відмова (англ. *degradation failure*);
- раптова відмова (англ. *sudden failure*);
- поступова відмова (англ. *gradual failure*);
- ураховувана відмова (англ. *relevant failure*);
- залежна відмова (англ. *seondary failure*);
- незалежна відмова (англ. *primary failure*);
- явна відмова (англ. *explicit failure*);
- прихована відмова (англ. *latent failure*);
- збій (англ. *interruption*).

*Аналіз відмов* (англ. *failure analysis*) – логічне та систематичне дослідження об’єкта, що відмовив, для ідентифікації та аналізу особливостей виникнення відмов, їх причин та наслідків.

За типом відмови розділяються на:

- *відмови функціонування*, коли виконання основних функцій об’єктом припиняється (наприклад, обрив проводів повітряної лінії електропередавання);
- *відмови параметричні*, коли деякі параметри об’єкта змінюються в неприпустимих межах (наприклад, неприпустиме зниження частоти або напруги).

За своєю природою відмови можуть бути:

- *випадкові*, обумовлені непередбачуваними перевантаженнями, дефектами матеріалу, помилками персоналу або збоями системи керування;
- *систематичні*, обумовлені закономірними й неминучими явищами, що викликають поступове нагромадження ушкоджень – втома , зношування , старіння, корозія тощо.

Основні ознаки класифікації відмов:

- характер та причина виникнення;
- характер усунення;
- легкість виявлення;
- час виникнення.

Класифікація відмов за різними ознаками наведена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

**Класифікація відмов за різними ознаками**

Класифікація відмов	Ознака відмов
За характером виникнення	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>раптова відмова (англ. sudden failure)</i> – відмова, що виявляється в різкому (миттєвому) зміні характеристик об'єкта;</li> <li>• <i>поступова відмова (англ. gradual failure)</i> – відмова, що відбувається в результаті повільного, поступового погіршення якості об'єкта.</li> </ul>
<p>Раптові відмови зазвичай виявляються у виді механічних ушкоджень елементів (тріщини, пробої ізоляції, обриви і т.п. ) і не супроводжуються попередніми видимими ознаками їхнього наближення. Раптові відмови характеризуються незалежністю моменту настання від часу попередньої роботи.</p> <p>Поступові відмови пов'язані зі зносом деталей і старінням матеріалів.</p>	
За причиною виникнення	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>конструкційна відмова (англ. design failure)</i> – викликана недоліками або невдалою конструкцією об'єкта;</li> <li>• <i>виробнича відмова (англ. manufacturing failure)</i> – пов'язана з помилками при виготовленні об'єкта через недосконалість або порушення технології;</li> <li>• <i>експлуатаційна відмова</i> – викликана порушенням правил експлуатації об'єкта.</li> </ul>
За характером усунення	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>стійка відмова</i>;</li> <li>• <i>нестійка (переміжна) відмова</i>, яка то виникає, то зникає;</li> <li>• <i>легка відмова</i> (яка може бути легко усунена);</li> <li>• <i>середня відмова</i> (не викликає відмови суміжних вузлів – вторинні відмови);</li> <li>• <i>важка відмова</i> (яка викликає вторинні відмови, або яка призводить до загрози життю та здоров'ю людини).</li> </ul>
За подальшим використанням об'єкта	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>повна відмова (англ. complete failure)</i>, що виключає можливість роботи об'єкта до її усунення;</li> <li>• <i>часткова відмова (англ. partial failure)</i>, при якій об'єкт може частково використовуватися.</li> </ul>
За легкістю виявлення	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>очевидна (явна) відмова</i>;</li> <li>• <i>прихована (неявна) відмова</i>.</li> </ul>
За часом виникнення	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>відмова приробітки</i>, що виникає у початковий період експлуатації;</li> <li>• <i>відмова при нормальній експлуатації</i>;</li> <li>• <i>відмови зносу</i>, викликана необоротними процесами зношування деталей, старіння матеріалів та ін.</li> </ul>

Щодо *тривалості та обсягу роботи*, використовуються наступні загальні поняття.

*Наробіток (англ. operating time)* – тривалість чи обсяг роботи об'єкта.

Наробіток може бути як неперервною величиною (наприклад, тривалість роботи в годинах), так і цілочисельною величиною (кількість робочих циклів, запусків тощо).

*Наробіток до відмови (англ. operating time to failure)* – наробіток об'єкта від початку експлуатації до виникнення першої відмови.

*Наробіток між відмовами (англ. operating time between failures)* – наробіток об'єкта від завершення відновлення його працездатного стану після відмови до виникнення наступної відмови.

*Ресурс (англ. useful life)* – сумарний наробіток об'єкта від початку експлуатації чи поновлення після ремонту до переходу в граничний стан.

*Термін служби (англ. useful lifetime)* – календарна тривалість експлуатації об'єкта від початку чи її поновлення до переходу в граничний стан.

*Тривалість відновлення (англ. time to recovery)* – інтервал часу, протягом якого об'єкт перебуває в непрацездатному стані через відмову.

*Тривалість технічного обслуговування (англ. maintenance time)* – інтервал часу, протягом якого виконується вручну чи автоматично операція технічного обслуговування та (чи) ремонту об'єкта.

*Період приробу (англ. early failure period)* – можливий початковий період наробітку об'єкта, протягом якого спостерігається стала тенденція до зменшення параметра потоку відмов, що зумовлено наявністю, поступовим виявленням та усуненням прихованих дефектів.

Щодо нормування та забезпечення надійності вживаються такі визначення.

*Нормування надійності (англ. dependability specification)* – встановлення у нормативній та (чи) конструкторській (проектній) документації кількісних і якісних вимог до надійності.

*Нормований показник надійності (англ. specified dependability measure)* – показник надійності, значення якого регламентовано нормативною та (або) конструкторською (проектною) документацією на об’єкт.

*Оптимальний показник надійності (англ. optimum dependability measure)* – значення нормованого показника надійності, визначене з урахуванням утрат через відмови та витрат на підвищення надійності чи за іншим критерієм.

*Приріб (для ремонтпридатного об’єкта) (англ. burn for repairable hardware)* – процес підвищення показників безвідмовності об’єкта, який використовує функціонування кожного виробу в належних навколишніх умовах з його успішним неплановим ремонтом після кожної відмови, протягом періоду ранніх відмов.

*Приріб (для неремонтпридатного об’єкта) (англ. burn for nonrepairable hardware)* – процес підвищення показників безвідмовності об’єкта, який використовує його функціонування у заданих умовах.

*Резервування (англ. redundancy)* – спосіб забезпечення надійності об’єкта за рахунок використання додаткових засобів та (або) можливостей, надлишкових відносно мінімально необхідних для виконання потрібних функцій.

*Структурне резервування (англ. structural redundancy)* – резервування з застосуванням резервних елементів структури об’єкта.

*Основний елемент (англ. major element)* – елемент об’єкта, необхідний для виконання потрібних функцій без використання резерву.

*Резервований елемент (англ. element under redundancy)* – основний елемент, на випадок відмови якого в об’єкті передбачені один або декілька резервних елементів, тобто таких, які призначені для виконання функцій основного елемента у разі його відмови.

*Резервний елемент (англ. redundancy element)* – елемент, призначений для виконання функцій основного елемента в разі його відмови.

*Кратність резерву (англ. redundancy ratio)* – відношення кількості резервних елементів до кількості резервованих ними елементів, виражене нескоротним дробом.

*Навантажений резерв (англ. active reserve)* – резерв, що містить один чи декілька резервних елементів, які перебувають у режимі основного елемента.

*Полегшений резерв (англ. reduced reserve)* – резерв, що складається з одного чи декількох резервних елементів, які перебувають у режимі меншого навантаження порівняно з основним елементом.

*Ненавантажений резерв (англ. standby reserve)* – резерв, що складається з одного чи декількох резервних елементів, які перебувають у ненавантаженому стані до початку виконання ними функцій основного елемента.

*Загальне резервування (англ. whole system redundancy)* – резервування, в якому резервується об'єкт в цілому.

*Роздільне резервування (англ. segregated redundancy)* – резервування, в якому резервуються окремі елементи об'єкта чи їх групи.

*Стале резервування (англ. continuous redundancy)* – таке, в якому використовують навантажений резерв і в якому, якщо відмовляє будь-який елемент в резервованій групі, виконання об'єктом потрібних функцій забезпечується без перемикань рештою елементів.

*Заміщувальне резервування (англ. standby redundancy)* – резервування, в якому функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови основного елемента.

*Ковзне резервування (англ. sliding redundancy)* – заміщувальне резервування, в якому група основних елементів резервується одним чи декількома резервними елементами, кожний з яких може замінити будь-який з елементів цієї групи у випадку його відмови.

*Резервування без відновлення (англ. redundancy without restoration)* – резервування, при якому відновлення основних і (чи) резервних елементів у випадках їх відмови технічно неможливе без порушення працездатності об'єкта в цілому та (або) не передбачене експлуатаційною документацією.

*Резервування з відновленням (англ. redundancy with restoration)* – це резервування основних і (чи) резервних елементів, у випадку їх відмови, технічно можливе без порушення працездатності об'єкта в цілому та передбачено експлуатаційною документацією.

*Аналіз надійності (англ. dependability analysis)* – систематизоване дослідження з метою визначення впливу на надійність об'єкта особливостей конструкції, технологічних процесів виробництва, умов експлуатації, технічного обслуговування та ремонту, а також визначення досягнутого рівня надійності при виконанні запланованих заходів щодо забезпечення і підвищення надійності та оцінка ефективності цих заходів.

*Проектне оцінювання надійності (англ. projected estimatic dependability)* – визначення сподіваних числових значень показників надійності проєктованого об'єкта на підставі даних про надійність його складових частин і структури об'єкта.

*Структурна схема надійності (англ. dependability structure diagram)* – структурна схема складного об'єкта, що подає його у вигляді сукупності певним чином сполучених у сенсі надійності його складових частин.

*Аналіз несправностей (англ. fault analysis)* – логічне та систематичне дослідження об'єкта для ідентифікації та аналізу ймовірностей виникнення, причин та наслідків потенційних несправностей.

*Аналіз відмов (англ. failure analysis)* – логічне та систематичне дослідження об'єкта, що відмовив, для ідентифікації та аналізу особливостей виникнення відмов, їх причин та наслідків.

*Технічне обслуговування (англ. preventive maintenance)* – комплекс операцій чи операція для підтримки справного стану чи працездатності об'єкта при використанні його за призначенням, під час простою, зберігання та транспортування.

*Ремонт (англ. repair)* – комплекс операцій для відновлення справного стану чи працездатності об'єкта та відновлення ресурсів об'єктів чи їх складових частин.

*Відновлення (англ. restoration)* – подія, яка полягає в тому, що після несправності об’єкт знову відновлює здатність виконувати потрібну функцію.

Для кількісної оцінки надійності застосовуються кількісні показники оцінки окремих її властивостей: безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності й збережуваності, а також комплексні показники, що характеризують готовність і ефективність використання технічних об’єктів (зокрема, електроустановок).

Ці показники дозволяють проводити розрахунково-аналітичне оцінювання кількісних характеристик окремих властивостей при виборі різних схемних і конструктивних варіантів устаткування (об’єктів) при їх розробленні, випробуваннях і в умовах експлуатації. Комплексні показники надійності використовуються головним чином на етапах випробувань і експлуатації при оцінюванні й аналізі відповідності експлуатаційно-технічних характеристик технічних об’єктів (пристроїв) заданим вимогам.

*Показник надійності (англ. dependability measure)* – кількісна характеристика однієї чи декількох із тих властивостей, які в сукупності складають надійність об’єкта.

Залежно від ситуації використовуються такі показники надійності:

- одиничний показник надійності (*англ. simple dependability measure*);
- комплексний показник надійності (*англ. integrated dependability measure*);
- експлуатаційний показник надійності (*англ. operational dependability measure*);
- експериментальний показник надійності (*англ. tstimated dependability measure*);
- розрахунковий показник надійності (*англ. analitikal dependability measure*);
- екстрапольований показник надійності (*англ. extrapolated dependability measure*);



- прогнозований показник надійності (англ. *predicted dependability measure*);
- середній показник надійності (англ. *average mean dependability measure*);
- гамма-відсотковий показник надійності (англ. *gamma-perentile operating dependability measure*);
- нестационарний показник надійності (en: *instantaneous dependability measure*);
- стаціонарний показник надійності (англ. *steady-state dependability measure*);

Надійність об'єкта є комплексною властивістю і може містити в собі безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та збережуваність чи певні поєднання цих властивостей (рис. 1.1).

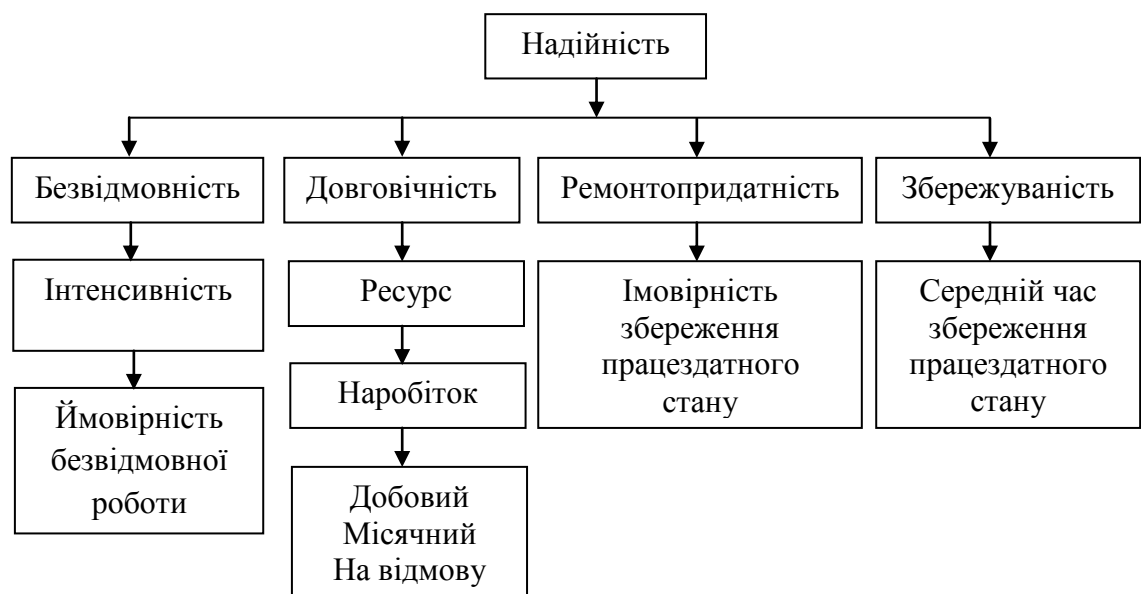


Рис. 1.1 – Комплексні властивості надійності об'єкта

*Безвідмовність* (англ. *reliability*) – властивість об'єкта виконувати потрібні функції в певних умовах протягом заданого інтервалу часу чи наробітку.

*Довговічність* (англ. *durability*) – властивість об'єкта виконувати потрібні функції до переходу у граничний стан при встановленій системі технічного обслуговування та ремонту.

*Ремонтпридатність* (англ. *maintainability*) – властивість об’єкта бути пристосованим до підтримання та відновлення стану, в якому він здатний виконувати потрібні функції за допомогою технічного обслуговування та ремонту.

*Збережуваність* – властивість виробу зберігати в заданих межах значення параметрів, що характеризують здатність виробу виконувати необхідні функції, протягом і після збереження або транспортування.

## 1.2 Основні показники безвідмовності об’єктів

*Інтенсивність відмов* (англ. *instantaneous failure rate*)  $\lambda(t)$  – умовна густина імовірності виникнення відмови об’єкта, яка визначається за умови, що до цього моменту відмова не виникла (тільки для невідновлюваних об’єктів);

*Середня інтенсивність відмов* (англ. *mean failure rate*)  $\lambda(t_1, t_2)$  – середнє значення інтенсивності відмов у заданому інтервалі часу.

*Імовірність безвідмовної роботи* (англ. *reliability function*)  $R(t_1, t_2)$  – імовірність того, що протягом заданого наробітку відмова об’єкта не виникне.

Із визначення ймовірності безвідмовної роботи видно, що ця характеристика є функцією часу, причому вона є спадною функцією і може набувати значень від 1 до 0. Графік імовірності безвідмовної роботи об’єкта зображено на рис. 1.2.

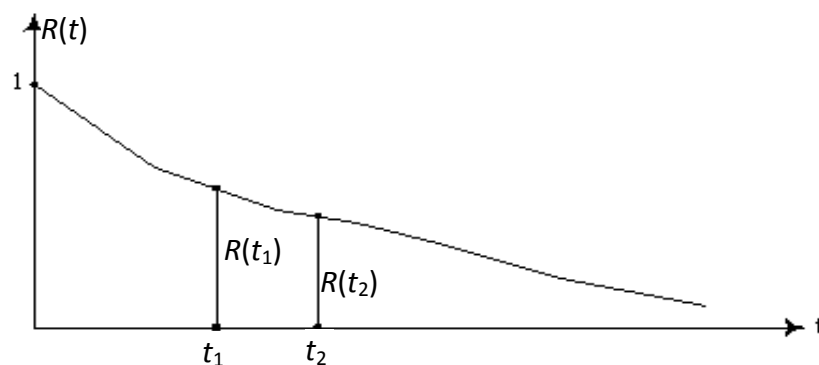


Рис. 1.2 – Графік імовірності безвідмовної роботи об’єкта

Як видно з графіка (рис. 1.2), функція  $R(t_1, t_2)$  характеризує зміну надійності в часі та є досить наочною оцінкою. Наприклад, на випробування поставлено 1000 зразків однотипних елементів, тобто  $n_0 = 1000$ . Під час випробування елементи, що відмовили, не заміняли справними. За проміжок часу  $(t_1, t_2)$  відмовило 10 елементів. Отже,  $R(t_1, t_2) = 0,99$ , тому будь-який елемент із цієї вибірки не відмовить за проміжок часу  $(t_1, t_2)$  з імовірністю  $R(t_1, t_2) = 0,99$ .

Іноді доцільно використовувати не ймовірність безвідмовної роботи, а ймовірність відмови  $F(t_1, t_2)$ . Оскільки працездатність і відмова – стани несумісні і протилежні, то їх імовірності пов'язані залежністю

$$R(t_1, t_2) + F(t_1, t_2) = 1, \quad (1.1)$$

тобто

$$F(t_1, t_2) = 1 - R(t_1, t_2). \quad (1.2)$$

На практиці досить часто доводиться визначати умовну ймовірність безвідмовної роботи об'єкта в заданому інтервалі часу  $R(t_1, t_2)$  за умови, що в момент часу  $t_1$  об'єкт працездатний і відомі  $R(t_1)$  та  $R(t_2)$ . На підставі формули ймовірності одночасної появи двох залежних подій, що визначаються добутком ймовірності виникнення однієї з них на умовну ймовірність другої, обчислену за умови, що перша подія вже настала, запишемо:

$$R(t_2) = R(t_1) \cdot R(t_1, t_2), \quad (1.3)$$

тобто

$$R(t_1, t_2) = \frac{R(t_2)}{R(t_1)}.$$

За відомими статистичними даними можна записати:

$$R(t_1, t_2) = \frac{N(t_2)}{N(t_1)},$$

де  $N(t_1), N(t_2)$  – кількість об'єктів, працездатних відповідно до моментів часу  $t_1$  і  $t_2$ , тобто

$$N(t_1) = N_0 - n(t_1); N(t_2) = N_0 - n(t_2), \quad (1.4)$$

де  $N_0$  – загальна кількість об'єктів, стан яких контролюється;  $n(t)$  – кількість відмов об'єктів за час  $(t)$ .

Зазначимо, що не завжди як напрацювання використовують час (у годинах, роках). Наприклад, для оцінювання ймовірності безвідмовної роботи комутаційних апаратів зі значною кількістю перемикачів (вакуумних вимикачів) як змінне значення напрацювання доцільно брати кількість циклів «увімкнути–вимкнути». Оцінюючи надійність ковзних контактів зручніше як напрацювання брати кількість проходжень струму цим контактом, а оцінюючи надійність об'єктів, що рухаються, напрацювання доцільно брати в одиницях довжини проходжень. Суть математичних виразів для визначення  $R(t_1, t_2)$ ,  $F(t_1, t_2)$  та  $\lambda(t)$  при цьому залишається незмінною.

*Середнє напрацювання до відмови (англ. mean operating time to first failure) MTTF* – математичне сподівання напрацювання об'єкта до першої відмови.

*Параметр потоку відмов (англ. instantaneous failure intensity)  $Z(t)$*  – відношення математичного сподівання кількості відмов відновлюваного об'єкта за досить мале його напрацювання до значення цього напрацювання.

*Середній параметр потоку відмов (англ. mean failure intensity)  $Z(t_1, t_2)$*  – середнє значення параметра потоку відмов у заданому інтервалі часу.

### 1.3 Показники довговічності та ремонтності

*Середній ресурс (англ. mean life)* – математичне сподівання ресурсу.

*Гамма-відсотковий ресурс (англ. gamma-percentile life)* – сумарне напрацювання, протягом якого об'єкт не досягне граничного стану з імовірністю  $\gamma$ , вираженою у відсотках.

*Середній термін служби (англ. mean lifetime)* – математичне сподівання терміну служби.

*Гамма-відсотковий термін служби (англ. gamma-percentile lifetime)* – календарна тривалість експлуатації, протягом якої об'єкт не досягне граничного стану з імовірністю  $\gamma$ , вираженою у відсотках.

*Імовірність відновлення* (англ. *probability of restoration*)  $M(t)$  – імовірність того, що час відновлення працездатного стану об'єкта не перевищить заданого значення.

*Середня тривалість відновлення* (англ. *mean restoration time*)  $MTTR$  – математичне сподівання часу відновлення працездатного стану об'єкта після відмови.

*Гамма-відсоткова тривалість відновлення* (англ. *gamma-percentile restoration time*) – інтервал часу, протягом якого відновлення працездатності об'єкта здійсниться з імовірністю  $\gamma$ , вираженою у відсотках.

*Інтенсивність відновлення* (англ. *instantaneous repair rate*)  $\mu(t)$  – умовна густина ймовірності відновлення працездатності об'єкта, яку визначають для одного моменту часу, якщо до цього моменту відновлення не завершилося.

*Середня інтенсивність відновлення* (англ. *mean repair rate*)  $\mu(t_1, t_2)$  – середнє значення інтенсивності в заданому інтервалі часу.

#### **1.4 Комплексні показники надійності**

*Готовність* (англ. *availability*) – здатність об'єкта виконувати потрібні функції в заданих умовах у будь-який час або протягом заданого інтервалу часу за умови забезпечення потрібними зовнішніми ресурсами. Ця здатність залежить від поєднання властивостей безвідмовності, ремонтності та забезпечення технічного обслуговування і ремонту.

*Коефіцієнт готовності* (англ. *instantaneous availability*)  $A(t)$  – імовірність того, що об'єкт виявиться працездатним у довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких використання об'єкта за призначенням не передбачено.

*Коефіцієнт неготовності* (англ. *instantaneous unavailability*)  $U(t)$  – імовірність того, що об'єкт виявиться непрацездатним у довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких використання об'єкта за призначенням не передбачено.

*Середній коефіцієнт готовності* (англ. *mean availability*)  $A(t_1, t_2)$  – середнє значення нестационарного коефіцієнта готовності у заданому інтервалі часу.

*Коефіцієнт оперативної готовності* (англ. *operational availability function*) – імовірність того, що, за винятком тих запланованих періодів, протягом яких використання об'єкта за призначенням не передбачено, він у довільний момент часу виявиться у працездатному стані і надалі виконуватиме потрібну функцію протягом заданого інтервалу часу.

*Коефіцієнт технічного використання* (англ. *steady state availability factor*) – відношення математичного сподівання сумарного часу перебування об'єкта у працездатному стані за деякий період експлуатації до математичного сподівання сумарного часу перебування об'єкта у працездатному стані та у простоях, зумовлених технічним обслуговуванням і ремонтом, за той самий період.

*Нормування надійності* (англ. *dependability specification*) – установлення у нормативній та (чи) конструкторській (проектній) документації кількісних і якісних вимог до надійності.

*Нормований показник надійності* (англ. *specified dependability measure*) – показник надійності, значення якого регламентовано нормативною та (або) конструкторською (проектною) документацією на об'єкт.

*Оптимальний показник надійності* (англ. *optimum dependability measure*) – значення нормованого показника надійності, обчислене з урахуванням втрат через відмови та витрат на підвищення надійності чи за іншим критерієм.

*Припрацювання (для ремонтного об'єкта)* (англ. *burn for repairable hardware*) – процес підвищення показників безвідмовності об'єкта, під час якого використовують функціонування кожного об'єкта за належних умов з його успішним неплановим ремонтом після кожної відмови, протягом періоду ранніх відмов.

## Запитання для самоперевірки

1. У чому полягає поняття надійності як властивості об'єкта?
2. Перелічите і дайте визначення основних станів і подій, якими характеризується надійність
3. У чому спільність і відмінності станів «справність» і «працездатність» об'єкта?
4. При яких умовах настає граничний стан об'єкта?
5. Якими можуть бути об'єкти за спроможністю до відновлення працездатного стану?
6. Якими можуть бути відмови за типами і природою походження?
7. Перелічите основні ознаки класифікації відмов.
8. Перелічите і дайте визначення властивостей (складових) надійності.
9. Дайте визначення показників надійності.

## 2 КОНТРОЛЬНА РОБОТА № 1. ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ОБ'ЄКТІВ, ЯКІ СКЛАДАЮТЬСЯ З НЕВІДНОВЛЮВАНИХ РЕЗЕРВОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

### 2.1 Основні теоретичні відомості та розрахункові співвідношення

Розглянемо структуру гіпотетичного об'єкта (електроустановки), який складається з невідновлюваних елементів. Для забезпечення надійної роботи об'єкта, як зазначено у розділі 1, використовуються різні види структурного резервування. На рис. 2.1 наведено два види резервування групи послідовно з'єднаних невідновлюваних елементів: загальне резервування, в якому резервується об'єкт у цілому (рис. 2.1, *а*) та роздільне резервування, в якому резервуються окремі елементи об'єкта чи їх групи (рис. 2.1, *б*).

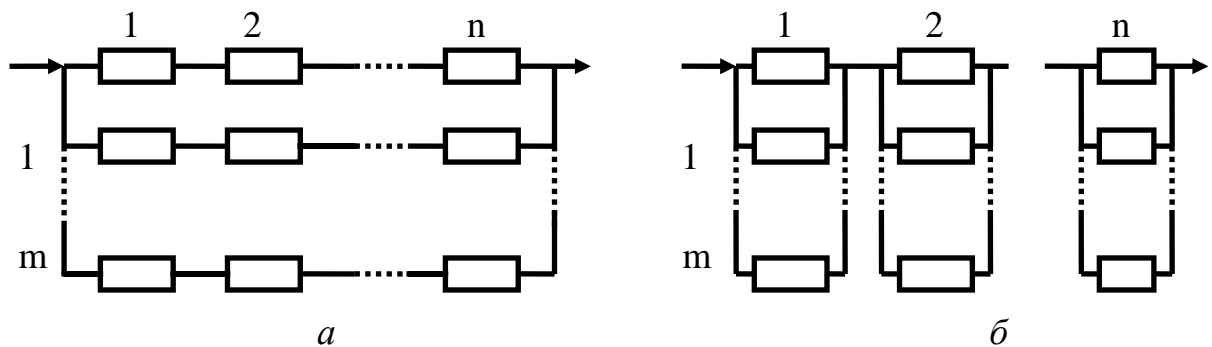


Рис. 2.1 – Приклад резервування групи послідовно з'єднаних невідновлюваних елементів: *а* – загальне; *б* – роздільне

Таку структуру можуть мати різні електроустановки – розподільні пристрої, батареї конденсаторів, релейно-контактні пристрої тощо.

Як зазначено у розділі 1, основними показниками надійності невідновлюваних об'єктів (елементів) є:

- інтенсивність відмов  $\lambda(t)$ ;
- імовірність безвідмовної роботи  $R(t_1, t_2)$ ;
- середнє напрацювання до відмови  $MTTF$ .



У загальному випадку аналітичний вираз імовірності безвідмовної роботи об'єкта має вигляд

$$R(t_1, t_2) = \exp \left\{ - \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \right\}. \quad (2.1)$$

Для експоненціального розподілу напрацювання об'єкта до відмови інтенсивність відмови  $\lambda(t) = \lambda = const$ , тож формула (2.1) набуває вигляду

$$R(t_1, t_2) = \prod_{i=1}^n R_i(t_1, t_2) = \exp \left\{ - \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \Delta t \right\}, \quad (2.2)$$

де  $\lambda_i$  – інтенсивність відмови  $i$ -го елемента;  $n$  – кількість послідовно з'єднаних основних елементів;  $R_i(t_1, t_2)$  – імовірність безвідмовної роботи  $i$ -го елемента.

Для об'єкта, що складається з  $n$  послідовно з'єднаних елементів, інтенсивність відмови

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t). \quad (2.3)$$

Для експоненціального розподілу напрацювання до відмови густина відмов  $i$ -го елемента  $\lambda_i(t) = \lambda_i = const$  і визначається за формулою:

$$\lambda_i = MTTF_i^{-1}, \quad (2.4)$$

де  $MTTF_i$  – середнє напрацювання до відмови  $i$ -го елемента.

У загальному випадку аналітичний вираз для визначення середнього напрацювання до відмови має вигляд:

$$MTTF = \int_{t_1}^{t_2} R(t_1, t_2) dt. \quad (2.5)$$

Для експоненціального розподілу напрацювання до відмови:

$$MTTF = \lambda^{-1} = \left( \sum_{i=1}^n \lambda_i \right)^{-1}, \quad (2.6)$$

де  $\lambda$  – інтенсивність відмов основного з'єднання з  $n$  елементів (або будь-якого з  $m$  резервних з'єднань).

У разі загального резервування з цілою кратністю (рис. 2.1, а) з урахуванням (2.2) імовірність безвідмовної роботи об'єкта, який складається з  $n$  послідовно з'єднаних основних елементів, становить:

$$R(t_1, t_2) = 1 - \left[ 1 - \prod_{i=1}^n R_i(t_1, t_2) \right]^{1+m}, \quad (2.7)$$

де  $m$  – кількість резервних з'єднань.

Для експоненціального розподілу напрацювання  $n$  рівнонадійних елементів об'єкта до відмови вираз (2.7) набуває вигляду:

$$R(0, t) = 1 - 1 - \exp(-\lambda_i \cdot t \cdot n)^{1+m} \quad (2.8)$$

Отже, з урахуванням формули (2.7), середнє напрацювання до відмови:

$$MTTF = \lambda^{-1} \sum_{j=1}^m (j+1)^{-1} \quad (2.9)$$

У разі роздільного резервування з цілою кратністю (рис. 2.1, б):

$$R(t_1, t_2) = \prod_{i=1}^n 1 - R_i(t_1, t_2)^{1+m} \quad (2.10)$$

або, з урахуванням (2.8):

$$R(0, t) = \prod_{i=1}^n 1 - 1 - \exp(-\lambda_i \cdot t \cdot n)^{1+m} \quad (2.11)$$

Якщо всі елементи об'єкта мають однаковий рівень надійності та однакову кратність резервування, то:

$$R(0, t) = 1 - 1 - \exp(\lambda_i \cdot t \cdot n)^{1+m} \cdot n \quad (2.12)$$

Середня кількість елементів на об'єктах, що перебувають в експлуатації і можуть відмовити до закінчення періоду експлуатації  $t = 1$  рік

$$N_{сер} = (m+1) \cdot n \cdot \lambda \cdot t \cdot c \quad (2.13)$$

де  $c$  – загальна кількість об'єктів.

Потрібна кількість резервних елементів становить:

$$N_a = \rho \cdot N_{сер} \quad (2.14)$$

де значення коефіцієнта  $\rho = f(\alpha, N_{сер})$  знаходять за табл. 2.1.

Таблиця 2.1

**Визначення коефіцієнту  $\rho = f(\alpha, \cdot N_{сер})$**

Значення $N_{сер}$								
$\alpha$	<25	50	75	100	150	200	300	400
0,90	1,24	1,18	1,15	1,12	1,10	1,09	1,07	1,06
0,92	1,27	1,20	1,16	1,14	1,11	1,10	1,08	1,07
0,94	1,30	1,22	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,08
0,96	1,35	1,25	1,20	1,17	1,14	1,12	1,10	1,09
0,98	1,41	1,30	1,24	1,21	1,17	1,15	1,12	1,10
0,99	1,47	1,34	1,27	1,23	1,19	1,17	1,13	1,12

Значення, які перебувають за межами таблиці, визначають за допомогою інтерполяції.

## 2.2 Зміст контрольної роботи № 1 та приклад розрахунку

Для двох видів резервованих об'єктів електроенергетичних систем:

- визначити кратність резервування для забезпечення потрібного рівня надійності;
- визначити та побудувати графічно функцію надійності;
- знайти річну потребу в резервних елементах;
- визначити середній час напрацювання до відмови;
- знайти імовірність безвідмовної роботи до першої відмови для заданого інтервалу часу.

Розглядаються невідновлювані структури двох гіпотетичних об'єктів з різними способами з'єднання резервних елементів:

- загальне резервування – резервується об'єкт у цілому (рис. 2.1, а);

- роздільне резервування – резервуються окремі елементи об’єкта чи їх групи (рис. 2.1, б).

Варіанти даних для розрахунку наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

### Варіанти даних для розрахунку

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Інтенсивність відмови кожного елементу $\lambda_i \times 10^{-3}$ , 1/рік	35	30	20	15	20	25	17	27	23	40
Кількість основних елементів $n$	12	18	20	23	21	17	26	16	28	13
Загальна кількість об’єктів $C$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Час $t_i$ (рік), у кінці якого $R(t)$ буде:	1,0	1,5	2,0	2,5	2,0	3,0	1,8	2,2	2,8	1,9
$R_{min} >$	0,9									
$R_{сер} >$	0,99									
$R_{max} >$	0,999									
Імовірність забезпечення резервними елементами	0,90	0,92	0,94	0,98	0,95	0,93	0,97	0,91	0,96	0,99

### Приклад розрахунку

Визначити характеристики надійності невідновлюваного резервованого об’єкта, який складається з 16 послідовно з’єднаних елементів.

Інтенсивність відмови всіх елементів об’єкта однакова і дорівнює  $\lambda=27 \cdot 10^{-3}$ (1/рік). Загальна кількість об’єктів на підприємстві:  $C = 17$ .

Визначити  $m$  – кратність резервування головної послідовної ланки елементів об’єкта, яка забезпечує рівень імовірності безвідмовної роботи

$$R_{min} = 0,9; R_{сер} = 0,99; R_{max} = 0,999$$

у кінці інтервалу  $t=2,2$  року для двох способів резервування (загального та роздільного).

Розрахувати та побудувати графічно функції надійності  $R_0(t)$  основних елементів об'єкта без резервування, а також функції  $R_{\min}(t)$ ;  $R_{\text{сер}}(t)$  та  $R_{\max}(t)$  для відповідних структур об'єкта з визначеною кратністю  $m$  загального та роздільного резервування.

Обчислити середнє напрацювання до відмови  $MTTF$  елементів об'єкта з загальним резервуванням.

Розрахувати річну потребу резервних елементів для об'єкта із загальним резервуванням з урахуванням ймовірності забезпечення  $\alpha=0,91$ .

**Розрахунок для способу загального резервування (рис. 2.1, а).**

Відповідно до виразу (2.2) визначаємо функцію  $R_i(t_i)$  для основних елементів об'єкта без резервування в інтервалі  $t=0,5-2,2$ :

$$R_0(t) = e^{(-n\lambda t)} = e^{(-16 \cdot 0,027 \cdot 0)} = 1;$$

$$R_{0,5}(t) = e^{(-n\lambda t)} = e^{(-16 \cdot 0,027 \cdot 0,5)} = 0,806;$$

$$R_1(t) = e^{(-n\lambda t)} = e^{(-16 \cdot 0,027 \cdot 1)} = 0,649;$$

$$R_{1,5}(t) = e^{(-n\lambda t)} = e^{(-16 \cdot 0,027 \cdot 1,5)} = 0,523;$$

$$R_2(t) = e^{(-n\lambda t)} = e^{(-16 \cdot 0,027 \cdot 2)} = 0,421.$$

Результати розрахунків показують, що рівень надійності основних елементів без резервування значно нижчий за потрібний:

$$R_{\min}(t=2) = 0,9; R_{\text{сер}}(t=2) = 0,99; R_{\max}(t=2) = 0,999,$$

тобто

$$R_{2,2}(t) = e^{(-n\lambda t)} = e^{(-16 \cdot 0,027 \cdot 2,2)} = 0,387.$$

Беремо кратність загального резервування  $m = 1$  і відповідно до виразу (2.8) обчислюємо ймовірність безвідмовної роботи елементів об'єкта із загальним резервуванням:

$$R_{\min} = 1 - \{1 - \exp[-\lambda_i t n]\}^{1+m} = 1 - \{1 - \exp[-16 \cdot 0,027 \cdot 2,2]\}^{1+1} = 0,624.$$

Підвищуємо кратність загального резервування:

– до рівня  $m = 2$  (дві резервних ланки):

$$R_{\min} = 1 - \{1 - \exp[-\lambda_i t n]\}^{1+m} = 1 - \{1 - \exp[-16 \cdot 0,027 \cdot 2,2]\}^{1+2} = 0,769;$$

– до рівня  $m = 3$ :

$$R_{\min} = 1 - \{1 - \exp[-\lambda_i t n]\}^{1+m} = 1 - \{1 - \exp[-16 \cdot 0,027 \cdot 2,2]\}^{1+3} = 0,858;$$

– до рівня  $m = 4$ :

$$R_{\min} = 1 - \{1 - \exp[-\lambda_i t n]\}^{1+m} = 1 - \{1 - \exp[-16 \cdot 0,027 \cdot 2,2]\}^{1+4} = 0,913.$$

Отже, як бачимо, невідновлюваний резервований об'єкт із кратністю загального резервування  $m = 4$  (рис. 2.1, а) задовольняє вимогу

$$R_0(t=2,2) > R_{\min}(t=2,2) \text{ або } 0,913 > 0,9.$$

Розрахуємо кратність резервування, потрібну для досягнення умов  $R_{\text{сер}}$  та  $R_{\text{max}}$ .

Підвищуємо кратність загального резервування:

– до рівня  $m = 5$ :

$$R_{\text{сер}} = 1 - \{1 - \exp[-\lambda_i t n]\}^{1+m} = 1 - \{1 - \exp[-16 \cdot 0,027 \cdot 2,2]\}^{1+5} = 0,947;$$

– до рівня  $m = 6$ :

$$R_{\text{сер}} = 1 - \{1 - \exp[-\lambda_i t n]\}^{1+m} = 1 - \{1 - \exp[-16 \cdot 0,027 \cdot 2,2]\}^{1+6} = 0,967;$$

– до рівня  $m = 7$ :

$$R_{\text{сер}} = 1 - \{1 - \exp[-\lambda_i t n]\}^{1+m} = 1 - \{1 - \exp[-16 \cdot 0,027 \cdot 2,2]\}^{1+7} = 0,98;$$

– до рівня  $m = 8$ :

$$R_{\text{сер}} = 1 - \{1 - \exp[-\lambda_i t n]\}^{1+m} = 1 - \{1 - \exp[-16 \cdot 0,027 \cdot 2,2]\}^{1+8} = 0,988;$$

– до рівня  $m = 9$ :

$$R_{\text{сер}} = 1 - \{1 - \exp[-\lambda_i t n]\}^{1+m} = 1 - \{1 - \exp[-16 \cdot 0,027 \cdot 2,2]\}^{1+9} = 0,992.$$

Отже, як бачимо, невідновлюваний резервований об'єкт із кратністю загального резервування  $m = 9$  задовольняє вимоги

$$R_0(t=2,2) > R_{\text{сер}}(t=2,2) \text{ або } 0,992 > 0,99.$$

Підвищуємо кратність загального резервування:

– до рівня  $m = 10$ :

$$R_{\text{max}} = 1 - \{1 - \exp[-\lambda_i t n]\}^{1+m} = 1 - \{1 - \exp[-16 \cdot 0,027 \cdot 2,2]\}^{1+10} = 0,995;$$

– до рівня  $m = 11$ :

$$R_{\text{max}} = 1 - \{1 - \exp[-\lambda_i t n]\}^{1+m} = 1 - \{1 - \exp[-16 \cdot 0,027 \cdot 2,2]\}^{1+11} = 0,997.$$

– до рівня  $m = 12$ :

$$R_{\text{max}} = 1 - \{1 - \exp[-\lambda_i t n]\}^{1+m} = 1 - \{1 - \exp[-16 \cdot 0,027 \cdot 2,2]\}^{1+12} = 0,998.$$

– до рівня  $m = 13$ :

$$R_{\max} = 1 - \{1 - \exp[-\lambda_i t n]\}^{1+m} = 1 - \{1 - \exp[-16 \cdot 0,027 \cdot 2,2]\}^{1+13} = 0,9989.$$

– до рівня  $m = 14$ :

$$R_{\max} = 1 - \{1 - \exp[-\lambda_i t n]\}^{1+m} = 1 - \{1 - \exp[-16 \cdot 0,027 \cdot 2,2]\}^{1+14} = 0,9993.$$

Отже, як бачимо, невідновлюваний резервований об'єкт із кратністю загального резервування  $m = 14$  задовольняє вимогу

$$R_0(t = 2,2) > R_{\max}(t = 2,2) \text{ або } 0,9993 > 0,999.$$

Щоб побудувати графік функції  $R_{\min}(t)$ , виконаємо розрахунки від  $R_0(t = 0) = 1$  до  $R_{\min}(t) = 0$  для  $m = 4$  з кроком, наприклад,  $t = 0,4$  року.

Виконуємо аналогічні розрахунки та будуємо графіки для об'єктів із заданою ймовірністю безвідмовної роботи  $R_{\text{сер}}(t)$  та  $R_{\max}(t)$  із відповідними кратностями резервування  $m$ , які забезпечують значення  $R_{\text{сер}}(t = 2) \geq 0,99$  та  $R_{\max}(t = 2) \geq 0,999$ .

$$R(t, m) = 1 - \{1 - \exp[-\lambda_i t n]\}^{1+m}; t = 0,4 - 4.$$

Графіки функцій  $R(t)$  для загального резервування показано на рис. 2.2.

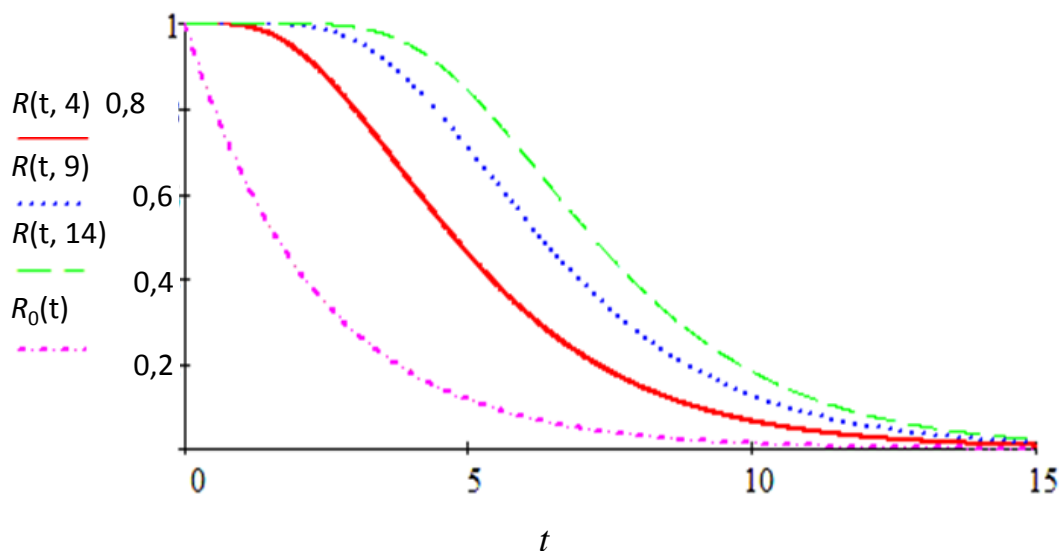


Рис. 2.2 – Графіки функцій  $R(t)$  для загального резервування

Розраховуємо відповідно до співвідношення (2.9) середній час напрацювання до відмови  $MTTF$  об'єктів із різною кратністю резервування:

– якщо  $m = 0$ ,

$$MTTF_0 = (\lambda n)^{-1} \sum_{i=1}^m (j+1)^{-1} = (16 \cdot 0,027)^{-1} \sum_{i=1}^0 (j+1)^{-1} = 2,31;$$

– якщо  $m = 4$ ,

$$MTTF_{\min} = (\lambda n)^{-1} \sum_{i=1}^m (j+1)^{-1} = (16 \cdot 0,027)^{-1} \sum_{i=1}^4 (j+1)^{-1} = 5,29.$$

Аналогічно розраховуємо параметри  $MTTF_{\text{сер}}(m)$  та  $MTTF_{\text{max}}(m)$  для раніше обчислених значень  $R_{\text{сер}}$  та  $R_{\text{max}}$ .

Знаходимо середній час напрацювання до відмови  $MTTF$  відповідно до співвідношення (2.9) об'єктів із різною кратністю резервування:

– якщо  $m = 9$ ,

$$MTTF_{\text{сер}} = (\lambda n)^{-1} \sum_{i=1}^m (j+1)^{-1} = (16 \cdot 0,027)^{-1} \sum_{i=1}^9 (j+1)^{-1} = 6,78;$$

– якщо  $m = 14$ ,

$$MTTF_{\text{max}} = (\lambda n)^{-1} \sum_{i=1}^m (j+1)^{-1} = (16 \cdot 0,027)^{-1} \sum_{i=1}^{14} (j+1)^{-1} = 7,68.$$

Відповідно до співвідношення (5.13) визначаємо середню кількість елементів  $N_{\text{сер}}$ , що перебувають в експлуатації та можуть відмовити до закінчення періоду експлуатації з урахуванням раніше обчислених значень  $MTTF$ . Наприклад,  $t = 1$  рік; якщо  $m = 0$ , то

$$N_{\text{сер}}(MTTF_0) = (m+1)n\lambda tc = (0+1) \cdot 16 \cdot 0,027 \cdot 1 \cdot 17 = 8.$$

Аналогічно знаходимо  $N_{\text{сер}}(MTTF_{\min})$ ,  $N_{\text{сер}}(MTTF_{\text{сер}})$  та  $N_{\text{сер}}(MTTF_{\text{max}})$ :

$$\text{якщо } m = 4, \text{ то } N_{\text{сер}}(MTTF_{\min}) = (m+1)n\lambda tc = (4+1) \cdot 16 \cdot 0,027 \cdot 1 \cdot 17 = 37;$$

$$\text{якщо } m = 9, \text{ то } N_{\text{сер}}(MTTF_{\text{сер}}) = (m+1)n\lambda tc = (9+1) \cdot 16 \cdot 0,027 \cdot 1 \cdot 17 = 74;$$

$$\text{якщо } m = 14, \text{ то } N_{\text{сер}}(MTTF_{\text{max}}) = (m+1)n\lambda tc = (14+1) \cdot 16 \cdot 0,027 \cdot 1 \cdot 17 = 111.$$

Відповідно до виразу (2.14) розрахуємо потрібну кількість резервних елементів для кожного обчисленого параметра  $N_{\text{сер}}(MTTF)$ .

Наприклад, для  $\lambda = 0,91$ :

$$\text{якщо } \rho = 1,26, \text{ то } N_{\alpha}(MTTF_0) = \rho N_{\text{сер}}(MTTF_0) = 1,26 \cdot 8 = 11;$$



якщо  $\rho = 1,23$ , то  $N_{\alpha}(MTTF_{\min}) = \rho N_{\text{сер}}(MTTF_{\min}) = 1,23 \cdot 37 = 46$ ;  
 якщо  $\rho = 1,15$ , то  $N_{\alpha}(MTTF_{\text{сер}}) = \rho N_{\text{сер}}(MTTF_{\text{сер}}) = 1,15 \cdot 74 = 86$ ;  
 якщо  $\rho = 1,12$ , то  $N_{\alpha}(MTTF_{\max}) = \rho N_{\text{сер}}(MTTF_{\max}) = 1,12 \cdot 74 = 125$ .

### ***Розрахунок для способу роздільного резервування (рис. 2.1, б)***

У цьому разі виконують поелементне резервування, тобто кожний елемент резервується окремо, але, оскільки інтенсивність відмови всіх основних елементів однакова, кожний основний елемент матиме однакову кількість резервних елементів.

Знаходимо ймовірність безвідмовної роботи елементів об'єкта з роздільним резервуванням.

Наприклад, якщо  $m = 1$ ,

$$R_{\min} = \{1 - [1 - \exp(-\lambda_i t)]^{1+m}\}^n = 1 - \{1 - \exp(-0,027 \cdot 2,2)\}^{1+1}\}^{16} = 0,94.$$

Отже, як бачимо, невідновлюваний резервований об'єкт із кратністю роздільного резервування  $m = 1$  (рис. 5.1, б) задовольняє вимогу

$$R_0(t = 2,2) > R_{\min}(t = 2,2) \text{ або } 0,948 > 0,9.$$

Щоб побудувати графік функції  $R_{\min}(t)$ , виконаємо розрахунки від  $R_0(t)$  до  $R_{\min}(t)$  для  $m = 1$  із кроком, наприклад,  $t = 0,4$  року.

Виконуємо аналогічні розрахунки та будуємо графіки для об'єктів із заданою ймовірністю безвідмовної роботи  $R_{\text{сер}}(t)$  та  $R_{\max}(t)$  з відповідними кратностями резервування  $m$ , які забезпечують

$$R_{\text{сер}}(t = 2,2) > 0,99 \text{ та } R_{\max}(t = 2,2) > 0,999.$$

Підвищуємо кратність роздільного резервування до  $m = 2$ , тоді

$$R_{\text{сер}} = \{1 - [1 - \exp(-\lambda_i t)]^{1+m}\}^n = 1 - \{1 - \exp(-0,027 \cdot 2,2)\}^{1+2}\}^{16} = 0,997.$$

Підвищуємо кратність роздільного резервування до  $m = 3$ , тоді

$$R_{\max} = \{1 - [1 - \exp(-\lambda_i t)]^{1+m}\}^n = 1 - \{1 - \exp(-0,027 \cdot 2,2)\}^{1+3}\}^{16} = 0,9998.$$

За результатами розрахунків будуємо графіки функції  $R = f(t)$  для об'єктів з ймовірністю безвідмовної роботи  $R_{\min}(t)$ ,  $R_{\text{сер}}(t)$  та  $R_{\max}(t)$ .

Графіки функцій  $R(\tau)$  для роздільного резервування показано на рис. 2.3.

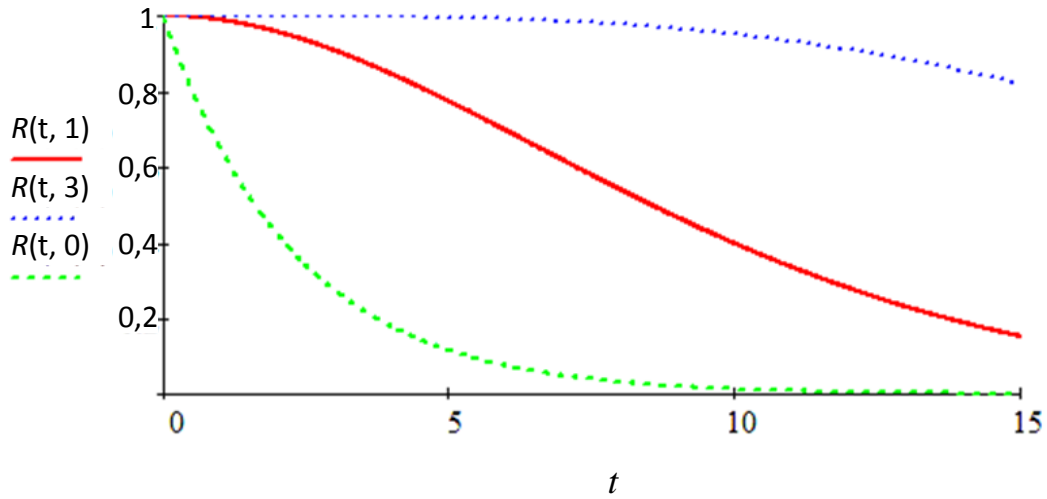


Рис. 2.3 – Графіки функцій  $R(t)$  для роздільного резервування

Визначаємо відповідно до співвідношення (2.9) середній час напрацювання до відмови  $MTTF$  об'єктів з різною кратністю резервування:

– якщо  $m = 0$ ,

$$MTTF_{\min} = (\lambda n)^{-1} \sum_{i=1}^m (j+1)^{-1} = (16 \cdot 0,027)^{-1} \sum_{i=1}^0 (j+1)^{-1} = 2,31;$$

– якщо  $m = 1$ ,

$$MTTF_{\min} = (\lambda n)^{-1} \sum_{i=1}^m (j+1)^{-1} = (16 \cdot 0,027)^{-1} \sum_{i=1}^1 (j+1)^{-1} = 3,47.$$

Аналогічні розрахунки параметрів  $MTTF_{\text{сер}}(m)$  та  $MTTF_{\text{max}}(m)$  виконують для раніше обчислених значень  $R_{\text{сер}}$  та  $R_{\text{max}}$ .

Визначаємо відповідно до співвідношення (2.9) середній час напрацювання до відмови  $MTTF$  об'єктів із різною кратністю резервування:

– якщо  $m = 2$ ,

$$MTTF_{\text{сер}} = (\lambda n)^{-1} \sum_{i=1}^m (j+1)^{-1} = (16 \cdot 0,027)^{-1} \sum_{i=1}^2 (j+1)^{-1} = 4,24;$$

– якщо  $m = 3$ ,

$$MTTF_{\text{max}} = (\lambda n)^{-1} \sum_{i=1}^m (j+1)^{-1} = (16 \cdot 0,027)^{-1} \sum_{i=1}^3 (j+1)^{-1} = 4,82.$$

Визначаємо середню кількість елементів  $N_{\text{сер}}$ , що перебувають в експлуатації та можуть відмовити до закінчення періоду експлуатації ( $t=1$  рік), ураховуючи раніше обчислені значення  $MTTF$ :

$$\text{якщо } m = 0, N_{\text{сер}}(MTTF_0) = (m + 1)n\lambda tc = (0 + 1) \cdot 16 \cdot 0,027 \cdot 1 \cdot 17 = 8.$$

Аналогічно знаходять  $N_{\text{сер}}(MTTF_{\min})$ ,  $N_{\text{сер}}(MTTF_{\text{сер}})$  та  $N_{\text{сер}}(MTTF_{\max})$ :

$$\text{якщо } m = 1, \text{ то } N_{\text{сер}}(MTTF_{\min}) = (m + 1)n\lambda tc = (1 + 1) \cdot 16 \cdot 0,027 \cdot 1 \cdot 17 = 15;$$

$$\text{якщо } m = 2, \text{ то } N_{\text{сер}}(MTTF_{\text{сер}}) = (m + 1)n\lambda tc = (2 + 1) \cdot 16 \cdot 0,027 \cdot 1 \cdot 17 = 23;$$

$$\text{якщо } m = 3, \text{ то } N_{\text{сер}}(MTTF_{\max}) = (m + 1)n\lambda tc = (3 + 1) \cdot 16 \cdot 0,027 \cdot 1 \cdot 17 = 30.$$

### **Запитання для самоперевірки**

1. Наведіть способи резервування.
2. Якими показниками визначається надійність невідновлюваних резервованих елементів?
3. Як визначають імовірність безвідмовної роботи системи, що складається з невідновлюваних елементів?
4. Як визначають середній наробіток до відмови системи, що складається з невідновлюваних елементів?
5. Як визначають потрібну кратність резервування?
6. Наведіть переваги та недоліки двох способів резервування.

### 3 КОНТРОЛЬНА РОБОТА № 2. ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ОБ'ЄКТІВ, ЯКІ СКЛАДАЮТЬСЯ З ВІДНОВЛЮВАНИХ НЕРЕЗЕРВОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

#### 2.1 Основні теоретичні відомості та розрахункові співвідношення

Основні показники надійності відновлюваних об'єктів (елементів) є:

- *параметр потоку відмов  $Z(t)$*  – відношення математичного сподівання кількості відмов відновлювального об'єкта за досить мале його напрацювання до значення цього напрацювання;
- *середня тривалість відновлення  $MTTR$*  – математичне сподівання часу відновлення працездатного стану об'єкта після відмови;
- *коефіцієнт готовності  $A(t)$*  – імовірність того, що об'єкт виявиться непрацездатним у довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких використання об'єкта за призначенням не передбачено.

Розрахункові співвідношення застосовують лише для надійного електроенергетичного устаткування, до якого належать найважливіші елементи електричних мереж – лінії електропередавання, силові трансформатори, вимикачі, реактори тощо. Для таких надійних елементів справедливе співвідношення:

$$MTTR_{i.\max} = (Z_{i.\max})^{-1} \gg \sum_{i=1}^n MTTR_i, \quad (3.1)$$

де  $Z_{i.\max}$  – максимальне значення параметра потоку відмов з усіх елементів об'єкта, що розглядається.

Параметр потоку відмов ділянки, яка складається з  $n$  послідовно з'єднаних елементів відповідно до виразу (2.3) з урахуванням виразу (2.4) визначають так:

$$Z_o = \sum_{i=1}^n Z_i. \quad (3.2)$$

Середня тривалість відновлення ділянки, яка складається з  $n$  послідовно з'єднаних відновлюваних нерезервованих елементів:

$$MTTR_o = (Z_o)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n (Z_i \cdot MTTR_i). \quad (3.3)$$

Середня тривалість відновлення об'єкта, який складається з  $m$  відновлюваних нерезервованих паралельно з'єднаних ділянок:

$$MTTR_o = \left[ \sum_{i=1}^m (MTTR_o)^{-1} \right]^{-1}. \quad (3.4)$$

Параметр потоку відмов об'єкта, який складається з  $m$  відновлюваних нерезервованих паралельно з'єднаних ділянок:

$$Z_o = \prod_{i=1}^m (Z_o \cdot MTTR_o) \cdot \sum_{i=1}^m (MTTR_o)^{-1}. \quad (3.5)$$

Середнє напрацювання об'єкта до відмови:

$$MTTF_o = (Z_o)^{-1}. \quad (3.6)$$

Коефіцієнт готовності об'єкта:

$$A(t) = MTTF_o \cdot (MTTF_o + MTTR_o)^{-1} \quad (3.7)$$

### 3.2 Зміст контрольної роботи № 2 та приклад розрахунку

Загальна розрахункова схема об'єкта наведена на рис. 3.1.

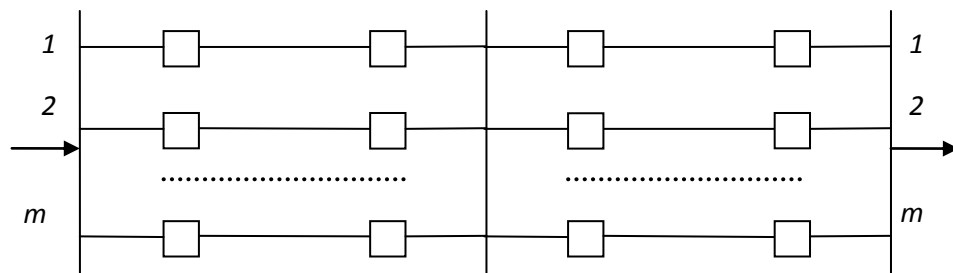


Рис. 3.1. – Загальна схема об'єкта, що складається з відновлюваних нерезервованих елементів

Таку структуру може мати фрагмент електричної мережі, кожна ділянка якого складається з трьох елементів – двох вимикачів та однієї лінії.

Для заданого відновлюваного нерезервованого об'єкта визначити:

- параметр потоку відмов  $Z(t)$ ;
- середній наробіток до відмови  $MTTF$ ;
- середню тривалість відновлення  $MTTR$ ;
- коефіцієнт готовності  $A(t)$ ;
- імовірність безвідмовної роботи  $R(t_1, t_2)$ ;

Варіанти даних для розрахунку наведені в табл. 3.1, а значення показників параметра потоку відмов  $Z_i$  та середньої тривалості відновлення елементів  $MTTR$  розрахункової схеми – в табл. 3.2.

Таблиця 3.1

**Варіанти даних для розрахунку**

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Напруга мережі, кВ	10	35	220	110	35	10	110	220	35	110
Довжина ЛЕП, км	12	28	160	90	21	15	120	180	20	70
Кількість паралельних ділянок m1	4	3	4	2	4	5	6	7	3	4
Кількість паралельних ділянок m2	3	5	2	5	3	4	2	2	5	3
Параметр потоку відмов	мін	сер	сер	мін	макс	мін	макс	макс	сер	макс

Таблиця 3.2

**Значення показників параметра потоку відмов  $Z_i$  та середньої тривалості відновлення елементів  $MTTR$**

Елемент	$Z_i$ , 1/рік			$MTTR \cdot 10^{-4}$ , рік
	мінім.	серед.	макс.	
Комірка вимикача В				8,0
10 кВ	0,01	0,02	0,03	7,0
35 кВ	0,02	0,03	0,04	6,0
110 кВ	0,02	0,04	0,06	5,0
220 кВ	0,02	0,05	0,07	
Лінія електропередавання*				
10 кВ	0,055	0,007	0,008	7,0
35 кВ	0,006	0,008	0,010	6,0
110 кВ	0,008	0,010	0,012	5,0
220 кВ	0,025	0,030	0,035	4,0

\* В табл. 3.2 показники  $Z_i$  наведено для лінії електропередавання довжиною 1 км, тобто відповідні значення треба помножити на задану довжину.

При складанні розрахункової схеми фрагмента електричної мережі умовно приймається, що довжина всіх ліній електропередавання однакова.

### Приклад розрахунку

Визначити характеристики надійності об'єкта з відновлюваними нерезервованими елементами відповідно до загальної схеми об'єкта, наведеної на рис. 3.1.

Напруга мережі  $U_n = 110$  кВ; довжина ЛЕП  $l = 180$  км; кількість паралельних ділянок  $m_1 = 7$ ; кількість паралельних ділянок  $m_2 = 2$ .

Складаючи розрахункову схему фрагмента електричної мережі, вважатимемо, що довжина всіх ліній електропередавання однакова. Значення параметра потоку відмов  $Z_i$  та середньої тривалості відновлення елементів  $MTTR$  розрахункової схеми наведено в табл. 3.2.

Згідно з заданими параметрами складаємо розрахункову схему (рис. 3.2).

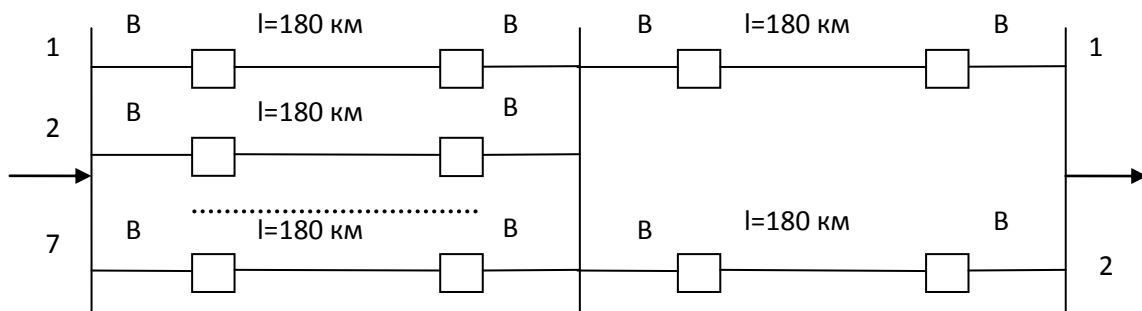


Рис. 3.2. – Розрахункова схема об'єкта, що складається з відновлюваних нерезервованих елементів

За виразом (3.2) розраховуємо параметр потоку відмов ділянки, яка складається з трьох послідовно з'єднаних елементів «В – ЛЕП – В»,

$$Z_d = Z_B + Z_{\text{ЛЕП}}l + Z_B = 0,02 + 0,008 \cdot 180 + 0,02 = 1,48 \text{ рік}^{-1}$$

За виразом (3.3) обчислюємо середню тривалість відновлення елементів ділянки

$$\begin{aligned} MTTR_d &= (Z_d)^{-1}(Z_B MTTR_B) + (Z_{\text{ЛЕП}}l) MTTR_{\text{ЛЕП}} + Z_B MTTR_B = \\ &= 1,48^{-1} \cdot (0,02 \cdot (5 \cdot 10^{-4}) + (0,008 \cdot 180) \cdot (4 \cdot 10^{-4}) + (0,02 \cdot (5 \cdot 10^{-4})) = \\ &= 4,02 \cdot 10^{-4} \text{ року.} \end{aligned}$$

За виразом (3.4) знаходимо середню тривалість відновлення фрагмента, який складається із семи паралельних ділянок,

$$MTTR_{m1} = (m_1 \cdot MTTR_d^{-1})^{-1} = (7 \cdot 4,02 \cdot 10^{-4})^{-1} = 0,574 \cdot 10^{-4} \text{ року.}$$

Середня тривалість відновлення фрагмента, який складається з двох паралельних ділянок,

$$MTTR_{m2} = (m_2 \cdot MTTR_d^{-1})^{-1} = (2 \cdot 4,02 \cdot 10^{-4})^{-1} = 2,01 \cdot 10^{-4} \text{ року.}$$

Згідно з виразом (3.5) розраховуємо параметр потоку відмов фрагмента, який складається із семи паралельних ділянок:

$$\begin{aligned} Z_{m1} &= (Z_d MTTR_d)^{m1} m1 MTTR_d = \\ &= (6,44 \cdot 4,02 \cdot 10^{-4})^7 \cdot 7 \cdot (4,02 \cdot 10^{-4})^{-1} = 1,36 \cdot 10^{-14} \text{ рік}^{-1}. \end{aligned}$$

Параметр потоку відмов фрагмента, який складається з двох паралельних ділянок:

$$\begin{aligned} Z_{m2} &= (Z_d \cdot MTTR_d)^{m2} m2 MTTR_d = \\ &= (6,44 \cdot 4,02 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 2 \cdot (4,02 \cdot 10^{-4})^{-1} = 0,033 \text{ рік}^{-1}. \end{aligned}$$

Обчислюємо параметр потоку відмов усього об'єкта:

$$Z_o = Z_{m1} + Z_{m2} = 1,36 \cdot 10^{-14} + 0,033 = 0,033 \text{ рік}^{-1}.$$

Середня тривалість відновлення всього об'єкта:

$$\begin{aligned} MTTR_o &= (Z_o)^{-1} \cdot (Z_{m1} \cdot MTTR_{m1} + Z_{m2} \cdot MTTR_{m2}) = \\ &= 0,0333^{-1} \cdot (1,36 \cdot 10^{-14} \cdot 5,74 \cdot 10^{-4} + 0,0333 \cdot 2,01 \cdot 10^{-4}) = \\ &= 2,01 \cdot 10^{-4} \text{ року.} \end{aligned}$$

За виразом (3.6) визначаємо середнє напрацювання до відмови всього об'єкта:

$$MTTF_o = (Z_o)^{-1} = (0,0333)^{-1} = 30 \text{ років.}$$

За виразом (3.7) обчислюємо коефіцієнт готовності об'єкта:

$$A(t) = MTTF_o (MTTF_o + MTTR_o)^{-1} = 30 \cdot (30 + 2,01 \cdot 10^{-4})^{-1} = 1,0.$$

Імовірність безвідмовної роботи об'єкта впродовж 1 року

$$R_o(t = 1,0) = \exp(-Z_o \cdot 1) = \exp(-0,0333 \cdot 1) = 0,96725.$$



## **Запитання для самоперевірки**

1. Якими показниками визначається надійність відновлюваних нерезервованих елементів?
2. Як визначають параметр потоку відмов системи, що складається з відновлюваних елементів?
3. Як визначають середню тривалість відновлення системи, що складається з послідовно з'єднаних відновлюваних елементів?
4. Як визначають середню тривалість відновлення системи, що складається з паралельно з'єднаних відновлюваних елементів?
5. Як визначають коефіцієнт готовності системи, що складається з відновлюваних елементів?
6. У чому полягає особливість оцінювання надійності електроенергетичного устаткування, що складається з відновлюваних елементів?

## 4 КОНТРОЛЬНА РОБОТА № 3. ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ СКЛАДНИХ СХЕМ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ

### 4.1 Основні теоретичні відомості та розрахункові співвідношення

Схеми електроенергетичних енергосистем або систем електропостачання не завжди є звичайним послідовно-паралельним з'єднанням елементів. Існують і більш складні схеми (наприклад, розподільні пристрої електростанцій чи підстанцій), в яких елементи з'єднані таким чином, що звичайне паралельно-послідовне спрощення неможливо.

Одним з методів розрахунку показників надійності таких схем є ***метод мінімальних перерізів***.

*Перерізом* деякої складної схеми називається група елементів, одночасна відмова яких веде до розриву всіх шляхів, з'єднуючих вхід та вихід схеми.

*Мінімальними перерізами* серед множини всіх перерізів схеми називаються перерізи, утворені мінімальним набором елементів, тобто такі, котрі під час видалення з них аби якого елемента вже не будуть перерізами.

У теорії надійності показано, що у разі виконання співвідношення (3.1), надійність послідовно з'єднаних мінімальних перерізів схеми визначає нижній кордон її надійності.

Тобто, для визначення надійності початкової складної схеми її потрібно перетворити в еквівалентну схему, яка складається з послідовного з'єднання всіх мінімальних перерізів, кожний з яких, у свою чергу, являє собою паралельне з'єднання елементів схеми, що утворюють даний мінімальний переріз.

Визначення мінімальних перерізів даної складної схеми виконується за зазначеним алгоритмом із застосуванням теорії графів.

Початкова схема відображається у вигляді замкненого графа, який має один вхід та один вихід. При цьому вхід графа вибирається таким, що його надійність значно вища, ніж надійність початкової схеми, а вихід – розрахункова точка визначення надійності. Ребра графа утворюють елементи схеми з відомою надійністю. Задача пошуку мінімальних перерізів зводиться до будування всіх дерев графа. Для цього до входу графа послідовно, одна за одною, приєднуються вершини, безпосередньо зв'язані з попереднім деревом (за виключенням виходу).

Реалізацію алгоритму пошуку мінімальних перерізів розглянемо на прикладі структури, схема якої наведена на рис. 5.1.

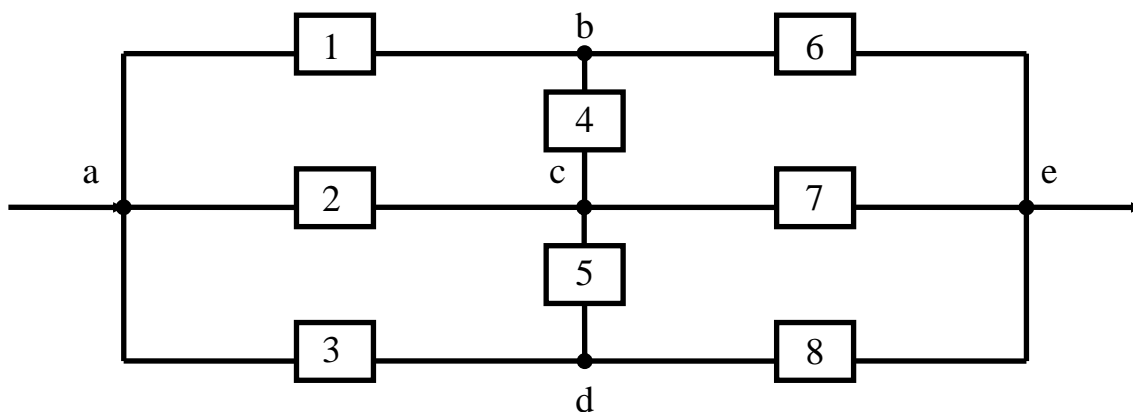


Рис. 4.1 – Приклад складної структури

1. Складається матриця безпосередніх зв'язків вершин та відповідних ребер графа (табл. 4.1):

Таблиця 4.1

**Матриця безпосередніх зв'язків вершин  
та відповідних ребер графа**

Вершини	Ребра, зв'язані з вершиною
a	1 2 3
b	1 4 6
c	2 4 5 7
d	3 5 8
e	6 7 8

2. Складається масив  $M$  дерев графа шляхом послідовного приєднання до дерева вершин  $M_{i+1}$ , безпосередньо зв'язаних з одною із вершин, належних до  $M_i$ -го дерева. Перше  $M_1$  дерево – це безпосередньо вершина «а». До неї приєднуються вершини «b», «с» і «d», що утворюють наступні дерева «ab», «ac» та «ad». На наступному етапі до дерева «ab» приєднується вершина «d», котра має безпосередній зв'язок з вершиною «а» дерева  $M_2$ . Таким чином, отримуємо  $M_3$  – дерево «abd». Аналогічно робиться приєднання всіх вершин за виключенням останньої вихідної вершини – у даному випадку вершини «е», тобто виходу графа. Таким чином, отримуємо масив  $M$  дерев графа: a, ab, ac, ad, abc, acd, abd, abcd.

3. Для кожного  $M_i$  дерева графа виконується пошук перерізів. Приклад пошуку перерізів для заданого графа наведений у вигляді табл. 4.2.

Таблиця 4.2

**Приклад складання матриці для пошуку мінімальних перерізів**

М-дерево	a	ab	ac	ad	abc	abd	acd	abcd
	123	123	123	123	123	123	123	123
Редра		146	2457	358	146	146	2457	146
					2457	358	358	2457
								358
Мінімальні перерізи	123	2346	13457	1258	3567	24568	1784	6 78

Під час складання перетинів, ребра, які входять у відповідну сукупність ребер дерева парну кількість разів – виключаються. Ребра, які залишились та утворюють переріз, – записуються у нижньому рядку таблиці.

4. З отриманих перерізів вибираються мінімальні. При цьому всі перерізи відтворюються в порядку підвищення числа елементів. Після цього робиться уточнення – чи не знаходяться в перерізах з більшим числом елементів перерізи з меншим числом елементів. У такому випадку перерізи з більшою кількістю елементів виключаються.

Отже, для заданої схеми мінімальні перерізи: 123; 1478; 678; 1258; 2346; 3567; 13457 та 24568.

5. Складається еквівалентна схема, яка є сукупністю послідовно з'єднаних мінімальних перерізів (рис. 4.2). Як було показано вище, надійність такої схеми заміщення буде не менше, ніж початкової.

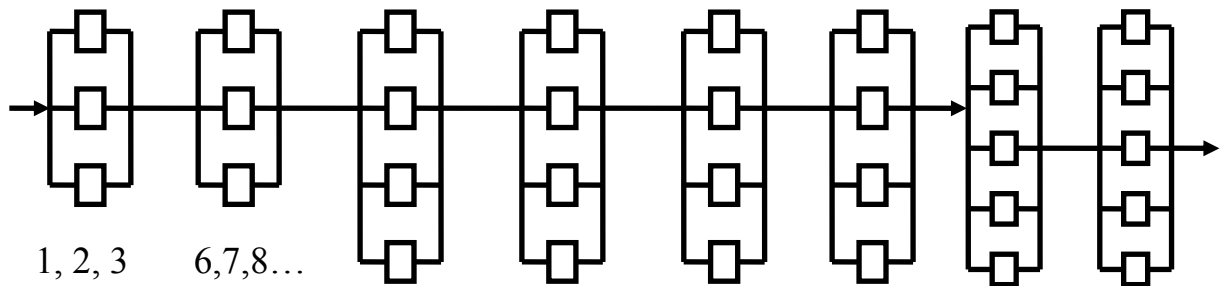


Рис. 4.2 – Еквівалентна схема

Далі знаходять показники надійності перетинів (як паралельне з'єднання), а також показники надійності всієї еквівалентної схеми.

#### 4.2 Зміст контрольної роботи та приклад розрахунку

Для заданої головної схеми електричних з'єднань визначити такі показники надійності на збірних шинах електростанції із застосуванням метода мінімальних перерізів:

- параметр потоку відмов  $Z(t)$ ;
- середній наробіток до відмови  $MTTF$ ;
- середню тривалість відновлення  $MTTR$ ;
- імовірність безвідмовної роботи  $R(t_1, t_2)$ ;
- математичне сподівання недовідпустки електроенергії з шин розподільного пристрою електростанції.

Загальна розрахункова схема розподільного пристрою електростанції наведена на рис. 4.3, а варіанти даних для розрахунку – у табл. 4.3.

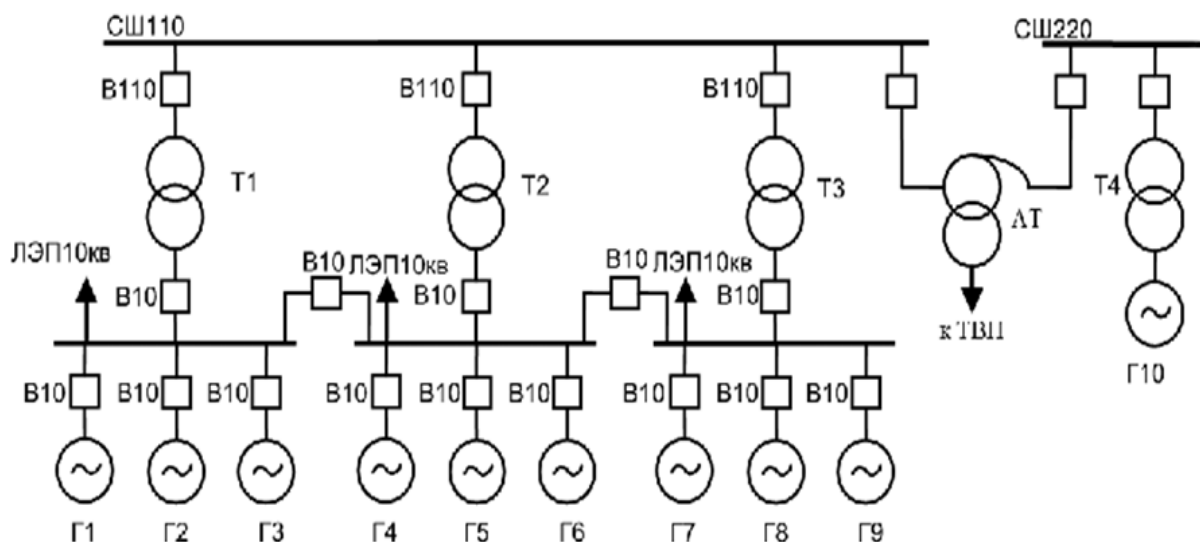


Рис. 5.3 – Загальна розрахункова схема розподільного пристрою електростанції

Таблиця 4.3

**Варіанти даних для розрахунку**

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кількість секцій РП-10 кВ	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3
Кількість генераторів на кожній секції шин	3	2	2	2	2	4	4	3	3	3
Кількість блоків	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2
Кількість ліній 10 кВ	36	24	24	24	24	24	24	36	36	36

Електрична схема, що розглядається, має низку спрощень: не показана схема з'єднань власних потреб, відсутні схеми живлення споживачів на генераторній напрузі, не показані роз'єднувачі та деякі інші види електрообладнання. Параметри елементів головної схеми електричних з'єднань електростанції наведені у табл. 4.4.

**Параметри елементів головної схеми електричних з'єднань електростанції**

Елемент схеми	$Z_i$ , 1/рік	$MTTR \cdot 10^{-4}$ , рік
Генератори (Г)	0,5	120
Вимикачі 10 кВ (В10)	0,015	15
Шини РП-10 кВ (Ш10)	0,03 (на одне приєднання)	5
Трансформори 110 кВ (Т110)	0,03	150
Вимикачі 110 кВ (В110)	0,02	20
Вимикачі 220 кВ (В220)	0,05	30
Трансформори 220 кВ (Т220)	0,05	180
Автотрансформатор (АТ)	0,055	160

**Приклад розрахунку**

Параметри елементів у прикладі, що розглядається:

Генератори електростанції  $Z_G = 0,5 \frac{1}{\text{рік}}$   $MTTR_G = 120 \cdot 10^{-4} \text{ рік}$

Вимикачі 10 кВ  $Z_{B10} = 0,015 \frac{1}{\text{рік}}$   $MTTR_{B10} = 15 \cdot 10^{-4} \text{ рік}$

Відповідно перша та друга секції шин РП-10 кВ

$Z_{Ш10} = 0,03 \frac{1}{\text{рік}}$   $MTTR_{Ш10} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ рік}$

Трансформатори 110 кВ  $Z_{T110} = 0,03 \frac{1}{\text{рік}}$   $MTTR_{T110} = 150 \cdot 10^{-4} \text{ рік}$

Вимикачі 110 кВ  $Z_{B110} = 0,02 \frac{1}{\text{рік}}$   $MTTR_{B110} = 20 \cdot 10^{-4} \text{ рік}$

Вимикачі 220 кВ  $Z_{B220} = 0,05 \frac{1}{\text{рік}}$   $MTTR_{B220} = 30 \cdot 10^{-4} \text{ рік}$

Трансформатори 220 кВ  $Z_{T220} = 0,05 \frac{1}{\text{рік}}$   $MTTR_{T220} = 180 \cdot 10^{-4} \text{ рік}$

Автотрансформатори  $Z_{AT} = 0,055 \frac{1}{\text{рік}}$   $MTTR_{AT} = 160 \cdot 10^{-4} \text{ рік}$

У схемі заміщення всі генератори об'єднані в один вхід схеми «А», а збірні шини 220 кВ – вихід схеми «D». Складаємо таблицю елементів з відповідними параметрами надійності (табл. 4.5).

### Таблиця елементів з відповідними параметрами надійності

48



Перевіряємо виконання співвідношення (3.1) для елементів схеми:

$$\begin{aligned} \sum MTTR_i &= 11 \cdot MTTR_{\Gamma} + 16 \cdot MTTR_{B10} + 3 \cdot MTTR_{Ш10} + 3 \cdot MTTR_{T110} + \\ &+ 4 \cdot MTTR_{B110} + 2 \cdot MTTR_{B220} + MTTR_{T220} + MTTR_{AT} = 11 \cdot (120 \cdot 10^{-4}) + \\ &+ 16 \cdot (15 \cdot 10^{-4}) + 3 \cdot (5 \cdot 10^{-4}) + 3 \cdot (150 \cdot 10^{-4}) + 4 \cdot (20 \cdot 10^{-4}) + 2 \cdot (30 \cdot 10^{-4}) + \\ &+ 180 \cdot 10^{-4} + 160 \cdot 10^{-4} = 0,2505 \text{ року} \cdot 8760 = 2194_{\text{г}} \end{aligned}$$

$$Z_{i_{\max}} = 0.5 \frac{1}{\text{рік}}$$

$$MTTF_{i_{\max}} = (Z_{i_{\max}})^{-1} \cdot 8760 = 17520_{\text{г}}$$

$$MTTF_{i_{\max}} \gg \sum MTTF_{i_{\max}} = 17520 \gg 2194_{\text{г}}$$

Як бачимо, умова (3.1) виконується, тобто надійність еквівалентної схеми заміщення, складеної з послідовно з'єднаних мінімальних перетинів, буде не менше, ніж початкова.

Виконуємо еквівалентне перетворення ділянок схеми заміщення для послідовних з'єднань елементів. При цьому ділянки з послідовними елементами 1-2, 7-8 та 9-10, які мають однакові параметри, відповідно перетворюємо в еквівалентні елементи 1', 2' і 3':

$$Z_{1'} = Z_{\Gamma} + Z_{B10} = 0,5 + 0,015 = 0,515 \frac{1}{\text{рік}}$$

$$\begin{aligned} MTTR_{1'} &= Z_{1'}^{-1} \cdot (Z_{\Gamma} \cdot MTTR_{\Gamma} + Z_{B10} \cdot MTTR_{B10}) = \\ &= 0,515^{-1} \cdot (0,5 \cdot (120 \cdot 10^{-4}) + 0,015 \cdot (15 \cdot 10^{-4})) = 0,0117 \text{ року} \end{aligned}$$

Таким самим чином перетворюємо ділянки з послідовними елементами 11-12, 17-18, 19-20 та 21-22, 27-28, 29-30 які мають однакові параметри, відповідно перетворюємо в еквівалентні елементи 4', 5' і 6' та 7', 8' і 9':

$$Z_{4'} = Z_{\Gamma} + Z_{B10} = 0,5 + 0,015 = 0,515 \frac{1}{\text{рік}}$$

$$\begin{aligned} MTTR_{4'} &= Z_{4'}^{-1} \cdot (Z_{\Gamma} \cdot MTTR_{\Gamma} + Z_{B10} \cdot MTTR_{B10}) = \\ &= 0,515^{-1} \cdot (0,5 \cdot (120 \cdot 10^{-4}) + 0,015 \cdot (15 \cdot 10^{-4})) = 0,0117 \text{ року} \end{aligned}$$

$$Z_{7'} = Z_{\Gamma} + Z_{B10} = 0,5 + 0,015 = 0,515 \frac{1}{\text{рік}}$$

$$\begin{aligned}
MTTR_{7'} &= Z_{7'}^{-1} \cdot (Z_{7'} \cdot MTTR_{7'} + Z_{B10} \cdot MTTR_{B10}) = \\
&= 0,515^{-1} \cdot (0,5 \cdot (120 \cdot 10^{-4}) + 0,015 \cdot (15 \cdot 10^{-4})) = 0,0117 \text{ року}
\end{aligned}$$

Виконуємо перетворення ділянки з паралельними елементами 1'-2'-3' в еквівалентний елемент 1'':

$$\begin{aligned}
Z_{1''} &= (Z_{1'} \cdot MTTR_{1'})^3 \cdot 3 \cdot (MTTR_{1'})^{-1} = (0,515 \cdot 0,0117)^3 \cdot 3 \cdot (0,0117)^{-1} = \\
&= 0,0000561 \frac{1}{\text{рік}}
\end{aligned}$$

$$MTTR_{1''} = [3 \cdot (MTTR_{1'})^{-1}]^{-1} = (3 \cdot (0,0117)^{-1})^{-1} = 0,0039 \text{ року}$$

Таким самим чином перетворюємо ділянки з паралельними елементами 4'-5'-6', та 7'-8'-9', відповідно, в еквівалентні елементи 6'' та 8'':

$$\begin{aligned}
Z_{6''} &= (Z_{4'} \cdot MTTR_{4'})^3 \cdot 3 \cdot (MTTR_{4'})^{-1} = (0,515 \cdot 0,0117)^3 \cdot 3 \cdot (0,0117)^{-1} = \\
&= 0,0000561 \frac{1}{\text{рік}}
\end{aligned}$$

$$MTTR_{6''} = [3 \cdot (MTTR_{4'})^{-1}]^{-1} = (3 \cdot (0,0117)^{-1})^{-1} = 0,0039 \text{ року}$$

$$\begin{aligned}
Z_{8''} &= (Z_{7'} \cdot MTTR_{7'})^3 \cdot 3 \cdot (MTTR_{7'})^{-1} = (0,515 \cdot 0,0117)^3 \cdot 3 \cdot (0,0117)^{-1} = \\
&= 0,0000561 \frac{1}{\text{рік}}
\end{aligned}$$

$$MTTR_{8''} = [3 \cdot (MTTR_{7'})^{-1}]^{-1} = (3 \cdot (0,0117)^{-1})^{-1} = 0,0039 \text{ року}$$

Виконуємо перетворення ділянки з послідовними елементами 1'' – 6 в еквівалентний елемент 1.1 з урахуванням заданої кількості приєднань на шинах 10 кВ:

$$Z_{1.1} = Z_{1''} + Z_{ш10} \cdot 12 = 0,0000561 + 0,03 \cdot 12 = 0,36 \frac{1}{\text{рік}}$$

$$\begin{aligned}
MTTR_{1.1} &= Z_{1.1}^{-1} \cdot (Z_{1.1} \cdot MTTR_{1''} + (Z_{ш10} \cdot 12) \cdot MTTR_{ш10}) = \\
&= 0,36^{-1} \cdot (0,0000561 \cdot 0,0039 + 0,03 \cdot 12 \cdot (5 \cdot 10^{-4})) = 0,000501 \text{ року}
\end{aligned}$$

Таким самим чином виконуємо перетворення ділянки з послідовними елементами 6''-16 та 8''-26 в еквівалентні елементи 6.1 та 8.1 з урахуванням заданої кількості приєднань на шинах 10 кВ:

$$Z_{6.1} = Z_{6''} + Z_{ш10} \cdot 12 = 0,0000561 + 0,03 \cdot 12 = 0,36 \frac{1}{\text{рік}}$$

$$MTTR_{6,1} = Z_{6,1}^{-1} \cdot (Z_{6,1} \cdot MTTR_{6''} + (Z_{ш10} \cdot 12) \cdot MTTR_{ш10}) =$$

$$= 0,36^{-1} \cdot (0,0000561 \cdot 0,0039 + 0,03 \cdot 12 \cdot (5 \cdot 10^{-4})) = 0,000501 \text{ року}$$

$$Z_{8,1} = Z_{8''} + Z_{ш10} \cdot 12 = 0,0000561 + 0,03 \cdot 12 = 0,36 \frac{1}{\text{рік}}$$

$$MTTR_{8,1} = Z_{8,1}^{-1} \cdot (Z_{8,1} \cdot MTTR_{8''} + (Z_{ш10} \cdot 12) \cdot MTTR_{ш10}) =$$

$$= 0,36^{-1} \cdot (0,0000561 \cdot 0,0039 + 0,03 \cdot 12 \cdot (5 \cdot 10^{-4})) = 0,000501 \text{ року}$$

Виконуємо перетворення ділянок з послідовними елементами 3-4-5, які мають однакові параметри, відповідно, в еквівалентний елемент 2.2:

$$Z_{2,2} = Z_{T110} + Z_{B10} + Z_{B110} = 0,03 + 0,015 \cdot 0,02 = 0,065 \frac{1}{\text{рік}}$$

$$MTTR_{2,2} = Z_{2,2}^{-1} \cdot (Z_{T110} \cdot MTTR_{T110} + Z_{B10} \cdot MTTR_{B110} + Z_{B110} \cdot MTTR_{B110}) =$$

$$= 0,065^{-1} \cdot (0,03 \cdot (150 \cdot 10^{-4}) + 0,015 \cdot (15 \cdot 10^{-4}) + 0,02 \cdot (20 \cdot 10^{-4})) =$$

$$= 0,00788 \text{ року}$$

Виконуємо перетворення ділянок з послідовними елементами 13-14-15 та 23-24-25, які мають однакові параметри, відповідно, в еквівалентні елементи 4.2 та 5.2:

$$Z_{4,2} = Z_{T110} + Z_{B10} + Z_{B110} = 0,03 + 0,015 \cdot 0,02 = 0,065 \frac{1}{\text{рік}}$$

$$MTTR_{4,2} = Z_{4,2}^{-1} \cdot (Z_{T110} \cdot MTTR_{T110} + Z_{B10} \cdot MTTR_{B110} + Z_{B110} \cdot MTTR_{B110}) = 0,065^{-1} \cdot$$

$$\cdot (0,03 \cdot (150 \cdot 10^{-4}) + 0,015 \cdot (15 \cdot 10^{-4}) + 0,02 \cdot (20 \cdot 10^{-4})) = 0,00788 \text{ року}$$

$$Z_{5,2} = Z_{T110} + Z_{B10} + Z_{B110} = 0,03 + 0,015 \cdot 0,02 = 0,065 \frac{1}{\text{рік}}$$

$$MTTR_{5,2} = Z_{5,2}^{-1} \cdot (Z_{T110} \cdot MTTR_{T110} + Z_{B10} \cdot MTTR_{B110} + Z_{B110} \cdot MTTR_{B110}) =$$

$$= 0,065^{-1} \cdot (0,03 \cdot (150 \cdot 10^{-4}) + 0,015 \cdot (15 \cdot 10^{-4}) + 0,02 \cdot (20 \cdot 10^{-4})) = 0,00788 \text{ року}$$

Виконуємо перетворення ділянок з послідовними елементами 31-32-33, які мають однакові параметри, відповідно, в еквівалентний елемент 10.5:

$$Z_{10,5} = Z_{AT} + Z_{B110} + Z_{B220} = 0,055 + 0,02 + 0,05 = 0,125 \frac{1}{\text{рік}}$$

$$MTTR_{10,5} = Z_{10,5}^{-1} \cdot (Z_{AT} \cdot MTTR_{AT} + Z_{B110} \cdot MTTR_{B110} + Z_{B220} \cdot MTTR_{B220}) = 0,065^{-1} \cdot$$

$$\cdot (0,03 \cdot (150 \cdot 10^{-4}) + 0,015 \cdot (15 \cdot 10^{-4}) + 0,02 \cdot (20 \cdot 10^{-4})) = 0,00788 \text{ року}$$

Еквівалентний елемент 3.4:

$$Z_{3,4} = Z_{B10} = 0,015 \frac{1}{\text{рік}}; \quad MTTR_{3,4} = MTTR_{B10} = 15 \cdot 10^{-4} \text{ року}$$

Еквівалентний елемент 7.4:

$$Z_{7,4} = Z_{B10} = 0,015 \frac{1}{\text{рік}}; \quad MTTR_{7,4} = MTTR_{B10} = 15 \cdot 10^{-4} \text{ року}$$

Виконуємо перетворення ділянок з послідовними елементами 34-35-36, які мають однакові параметри, відповідно, в еквівалентний елемент 9.3:

$$Z_{9,3} = Z_{\Gamma} + Z_{T220} + Z_{B220} = 0,5 + 0,05 + 0,05 = 0,6 \frac{1}{\text{рік}}$$

$$MTTR_{10,5} = Z_{10,5}^{-1} \cdot (Z_{AT} \cdot MTTR_{AT} + Z_{B110} \cdot MTTR_{B110} + Z_{B220} \cdot MTTR_{B220}) = 0,065^{-1} \cdot (0,03 \cdot (150 \cdot 10^{-4}) + 0,015 \cdot (15 \cdot 10^{-4}) + 0,02 \cdot (20 \cdot 10^{-4})) = 0,00788 \text{ року}$$

$$MTTR_{9,3} = Z_{9,3}^{-1} \cdot (Z_{\Gamma} \cdot MTTR_{\Gamma} + Z_{T220} \cdot MTTR_{T220} + Z_{B220} \cdot MTTR_{B220}) = 0,06^{-1} \cdot (0,05 \cdot (120 \cdot 10^{-4}) + 0,05 \cdot (180 \cdot 10^{-4}) + 0,05 \cdot (30 \cdot 10^{-4})) = 0,0117 \text{ року}$$

Після виконаних перетворень схема приймає вигляд, наведений на рис. 4.5:

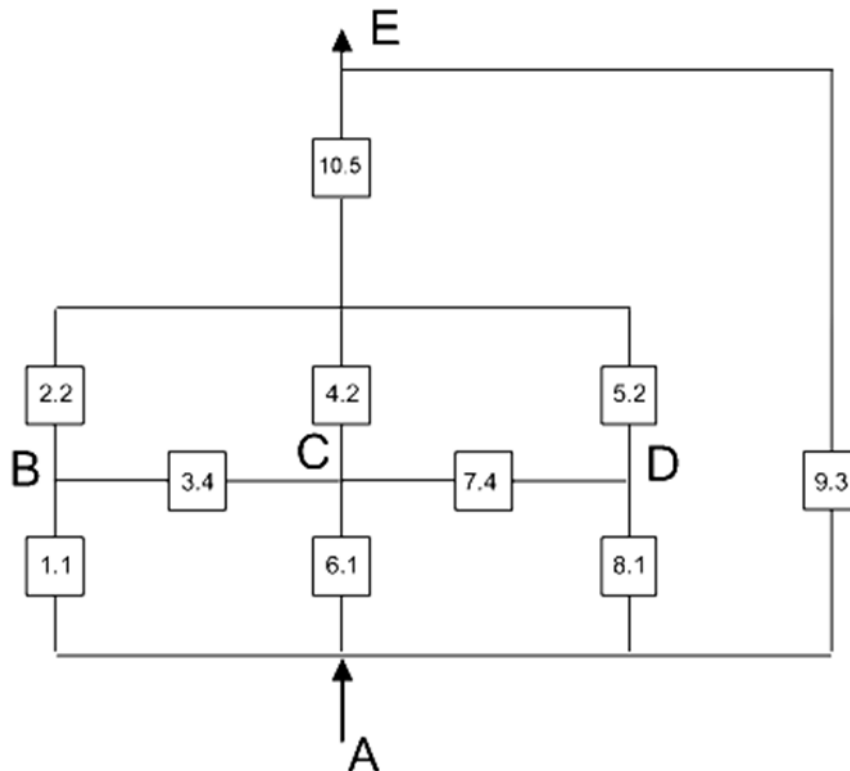


Рис. 4.5 – Вигляд схеми після перетворення

Оскільки елементи схеми, наведений на рис. 4.5, розміщені таким чином, що їх подальше звичайне еквівалентування неможливо, то для подальшого еквівалентування схеми застосовуємо метод мінімальних перерізів.

Складаємо матрицю безпосередніх зв'язків вершин та ребер схеми (табл. 4.6).

Таблиця 4.6

**Матриця безпосередніх зв'язків вершин та ребер схеми**

Вершини	Ребра зв'язані з вершиною
A	1.1, 6.1, 8.1, 9.3
B	1.1, 2.2, 3.4
C	3.4, 4.2, 6.1, 7.4
D	5.2, 7.4, 8.1
E	9.3, 10.5

Складаємо масив дерев: а, ab, ac, abc. Пошук мінімальних перерізів наведений в табл. 4.7.

Таблиця 4.7

**Пошук мінімальних перерізів**

М-дерево	A	AB	AC	AD	ABC	ABE	ACE	ABCE	ABCDE
	1.1, 6.1, 8.1, 9.3								
Ребра		<del>1.1</del> , 6.1, 8.1	1.1, <del>6.1</del> , 8.1	1.1, 6.1, <del>8.1</del>	<del>1.1</del> , <del>6.1</del> , 8.1	<del>1.1</del> , 6.1, <del>8.1</del>	1.1, <del>6.1</del> , 8.1	<del>1.1</del> , <del>6.1</del> , <del>8.1</del>	<del>1.1</del> , <del>6.1</del>
		<del>1.1</del> , 2.2, 3.4	3.4, 4.2, <del>6.1</del> , 7.4	5.2, 7.4, <del>8.1</del>	<del>1.1</del> , 2.2, <del>3.4</del>	<del>1.1</del> , 2.2, 3.4	3.4, 4.2, <del>6.1</del> , 7.4	<del>1.1</del> , 2.2, <del>3.4</del>	2.2, <del>3.4</del>
					3.4, 4.2, <del>6.1</del> , 7.4	5.2, 7.4, <del>8.1</del>	5.2, <del>7.4</del> , <del>8.1</del>	3.4, 4.2, <del>6.1</del> , <del>7.4</del>	1.1, 4.2 5.2, 7.4
		9.3.						5.2, <del>7.4</del> , <del>8.1</del>	3.4, 7.4 5.2, 7.4
Перерізи	1.1, 6.1, 8.1, 9.3,	2.2, 3.4, 6.1, 8.1, 9.3	1.1, 8.1, 3.4, 4.2, 7.4, 9.3	1.1, 6.1, 5.2, 7.4, 9.3	8.1, 2.2, 4.2, 7.4, 9.3	6.1, 8.1, 3.4, 9.3, 4.2, 5.2, 10.5	1.1, 8.1, 3.4, 7.4, 9.3, 10.5, 2.2, 5.2	8.1, 9.3, 7.4, 5.2, 10.5	9.3, 10.5

Складаємо розрахункову схему, яка є сукупністю послідовно з'єднаних мінімальних перерізів (рис. 4.6). Зі схеми вилучаємо перетини, які мають п'ять і більше паралельних елементів (як такі, що суттєво не впливають на остаточну надійність). Залишаємо перетини 9.3, 10.5 та 1.1, 6.1, 8.1, 9.3.

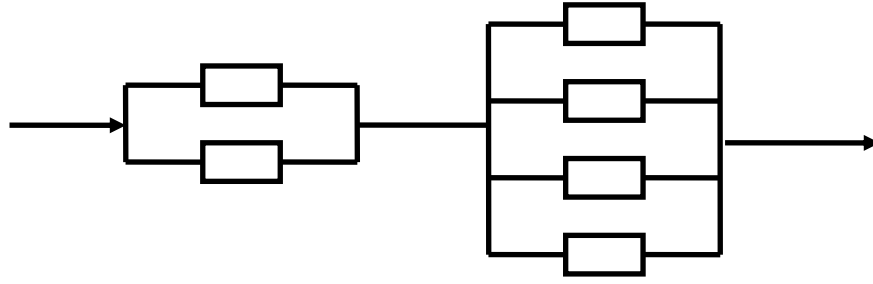


Рис. 5.6 – Розрахункова схема

Визначаємо показники надійності перерізів та всієї розрахункової схеми.

Виконуємо перетворення мінімального перерізу з елементами 1.1 – 6.1 – 8.1 в еквівалентний елемент 1\*:

$$MTTR_{1*} = [3 \cdot (MTTR_1)^{-1}]^{-1} = [3 \cdot (0,000501)^{-1}]^{-1} = 0,000167 \text{ року}$$

$$Z_{1*} = (Z_1 \cdot MTTR_1)^3 \cdot 3 \cdot (MTTR_1)^{-1} = (0,36 \cdot 0,000501)^3 \cdot 3 \cdot (0,000501)^{-1} = 3,513 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{рік}}$$

Виконуємо перетворення мінімального перерізу з елементами 6.1 – 8.1 – 2.2 – 3.4 в еквівалентний елемент 2\*:

$$MTTR_{2*} = [2 \cdot (MTTR_6)^{-1} + (MTTR_2)^{-1} + (MTTR_3)^{-1}]^{-1} = [2 \cdot (0,000501)^{-1} + (0,00788)^{-1} + (15 \cdot 10^{-4})^{-1}]^{-1} = 2,09 \cdot 10^{-4} \text{ року}$$

$$Z_{2*} = (Z_6 \cdot MTTR_6)^2 \cdot (Z_2 \cdot MTTR_2) \cdot (Z_3 \cdot MTTR_3) \cdot (2 \cdot MTTR_1^{-1} + MTTR_2^{-1} + MTTR_3^{-1}) = 1,794 \cdot 10^{-12} \frac{1}{\text{рік}}$$

Виконуємо перетворення мінімального перерізу з елементами 1.1 – 8.1 – 3.4 – 4.2 – 7.4 в еквівалентний елемент 3\*:

$$MTTR_{3*} = [2 \cdot (MTTR_1)^{-1} + 2 \cdot (MTTR_3)^{-1} + (MTTR_4)^{-1}]^{-1} = [2 \cdot (0,000501)^{-1} + 2 \cdot (15 \cdot 10^{-4})^{-1} + (0,00788)^{-1}]^{-1} = 1,834 \cdot 10^{-4} \text{ року}$$

$$Z_{3*} = (Z_1 \cdot MTTR_1)^2 \cdot (Z_3 \cdot MTTR_3)^2 \cdot (Z_4 \cdot MTTR_4) \cdot (2 \cdot MTTR_1^{-1} + 2 \cdot MTTR_3^{-1} + MTTR_4^{-1}) = 0 \frac{1}{\text{рік}}$$

Виконуємо перетворення мінімального перерізу з елементами 1.1 – 6.1 – 5.2 – 7.4 в еквівалентний елемент 4\*:

$$\begin{aligned}
 MTTR_{4*} &= [2 \cdot (MTTR_1)^{-1} + (MTTR_5)^{-1} + (MTTR_7)^{-1}]^{-1} = \\
 &= [2 \cdot (0,000501)^{-1} + (15 \cdot 10^{-4})^{-1} + (0,00788)^{-1}]^{-1} = 2,09 \cdot 10^{-4} \text{ року} \\
 Z_{4*} &= (Z_1 \cdot MTTR_1)^2 \cdot (Z_5 \cdot MTTR_5) \cdot (Z_7 \cdot MTTR_7) \cdot \\
 &\cdot (2 \cdot MTTR_1^{-1} + MTTR_5^{-1} + MTTR_7^{-1}) = 1,719 \cdot 10^{-12} \frac{1}{\text{рік}}
 \end{aligned}$$

Виконуємо перетворення мінімального перерізу з елементами 8.1 – 2.2 – 4.2 – 7.4 в еквівалентний елемент 5\*:

$$\begin{aligned}
 MTTR_{5*} &= [2 \cdot (MTTR_2)^{-1} + (MTTR_1)^{-1} + (MTTR_7)^{-1}]^{-1} = \\
 &= [2 \cdot (0,00788)^{-1} + (15 \cdot 10^{-4})^{-1} + (0,000501)^{-1}]^{-1} = 3,429 \cdot 10^{-4} \text{ року} \\
 Z_{5*} &= (Z_2 \cdot MTTR_2)^2 \cdot (Z_1 \cdot MTTR_1) \cdot (Z_7 \cdot MTTR_7) \cdot \\
 &\cdot (2 \cdot MTTR_2^{-1} + MTTR_1^{-1} + MTTR_7^{-1}) = 3,105 \cdot 10^{-12} \frac{1}{\text{рік}}
 \end{aligned}$$

Виконуємо перетворення мінімального перерізу з елементами 2.2 – 3.4 – 5.2 – 6.1 – 7.4 в еквівалентний елемент 6\*:

$$\begin{aligned}
 MTTR_{6*} &= [2 \cdot (MTTR_2)^{-1} + 2 \cdot (MTTR_3)^{-1} + (MTTR_6)^{-1}]^{-1} = \\
 &= [2 \cdot (0,00788)^{-1} + 2 \cdot (15 \cdot 10^{-4})^{-1} + (0,000501)^{-1}]^{-1} = 2,791 \cdot 10^{-4} \text{ року} \\
 Z_{6*} &= (Z_2 \cdot MTTR_2)^2 \cdot (Z_3 \cdot MTTR_3)^2 \cdot (Z_6 \cdot MTTR_6) \cdot \\
 &\cdot (2 \cdot MTTR_2^{-1} + 2 \cdot MTTR_3^{-1} + MTTR_6^{-1}) = 0 \frac{1}{\text{рік}}
 \end{aligned}$$

Виконуємо перетворення мінімального перерізу з елементами 1.1 – 4.2 – 5.2 – 7.4 в еквівалентний елемент 7\*:

$$\begin{aligned}
 MTTR_{7*} &= [2 \cdot (MTTR_4)^{-1} + (MTTR_1)^{-1} + (MTTR_7)^{-1}]^{-1} = \\
 &= [2 \cdot (0,00788)^{-1} + (15 \cdot 10^{-4})^{-1} + (0,000501)^{-1}]^{-1} = 3,429 \cdot 10^{-4} \text{ року} \\
 Z_{7*} &= (Z_4 \cdot MTTR_4)^2 \cdot (Z_1 \cdot MTTR_1) \cdot (Z_7 \cdot MTTR_7) \cdot \\
 &\cdot (2 \cdot MTTR_4^{-1} + MTTR_1^{-1} + MTTR_7^{-1}) = 3,105 \cdot 10^{-12} \frac{1}{\text{рік}}
 \end{aligned}$$

Виконуємо перетворення мінімального перерізу з елементами 2.2 – 4.2 – 5.2 в еквівалентний елемент 8\*:

$$MTTR_{8*} = [3 \cdot (MTTR_2)^{-1}]^{-1} = (3 \cdot (0,00708)^{-1})^{-1} = 0,0026 \text{ року}$$

$$\begin{aligned} Z_{8*} &= (Z_2 \cdot MTTR_2)^3 \cdot 3 \cdot (MTTR_2)^{-1} = (0,65 \cdot 0,00788)^3 \cdot 3 \cdot (0,00788)^{-1} = \\ &= 5,116 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{рік}} \end{aligned}$$

Визначаємо показники надійності всієї розрахункової схеми, яка є сукупністю послідовно з'єднаних елементів 1\*, 2\*, 3\*, 4\*, 5\*, 6\*, 7\* та 8\*:

$$\begin{aligned} Z_{\Sigma} &= Z_{1*} + Z_{2*} + Z_{3*} + Z_{4*} + Z_{5*} + Z_{6*} + Z_{7*} + Z_{8*} = \\ &= 3,515 \cdot 10^{-8} + 1,794 \cdot 10^{-12} + 0 + 1,794 \cdot 10^{-12} + 3,105 \cdot 10^{-12} + \\ &+ 0 + 3,105 \cdot 10^{-12} + 5,116 \cdot 10^{-8} = 8,63 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{рік}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} MTTR_{\Sigma} &= Z_{\Sigma}^{-1} \cdot (Z_{1*} \cdot MTTR_{1*} + Z_{2*} \cdot MTTR_{2*} + Z_{3*} \cdot MTTR_{3*} + \\ &+ Z_{4*} \cdot MTTR_{4*} + Z_{5*} \cdot MTTR_{5*} + Z_{6*} \cdot MTTR_{6*} + Z_{7*} \cdot MTTR_{7*} + Z_{8*} \cdot \\ &\cdot MTTR_{8*}) = 1,625 \cdot 10^{-3} \text{ року} \end{aligned}$$

### Запитання для самоперевірки

1. У яких випадках для визначення показників надійності застосовують метод мінімальних перерізів?
2. У чому полягає перевірка допустимості коректного застосування методу мінімальних перерізів?
3. Що таке «переріз» та «мінімальний переріз» схеми електричних з'єднань?
4. Як саме визначаються всі мінімальні перерізи схеми електричних з'єднань?
5. Як складають розрахункову схему за методом мінімальних перерізів?
6. Наведіть алгоритм пошуку мінімальних перерізів.



## 5 КОНТРОЛЬНА РОБОТА № 4. НЕПАРАМЕТРИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

### 5.1 Основні теоретичні відомості та розрахункові співвідношення

Оцінка надійності схем електропостачання за допомогою чисельних параметрів, а саме – потоку відмов, середнього наробітку до відмови, коефіцієнта готовності та інших відомих показників має низку недоліків. Зокрема, для параметричної оцінки надійності схем електропостачання треба мати значення параметрів надійності елементів схеми. При цьому достатньо широкий довірчий інтервал для оцінки надійності елементів забезпечує не дуже високу точність оцінок надійності системи електропостачання та не дозволяє відрізняти варіанти, які мають високу надійність. Отже, параметрична оцінка не враховує ступеня важливості різних споживачів у системі електропостачання, а також не дає можливості виявити вплив на розрахунок надійності ступеня складності конфігурації електричної мережі.

*Непараметрична оцінка* (НО) надійності схем електропостачання, на відміну від параметричної, дозволяє для кожної схеми електропостачання визначити безрозмірний параметр НО залежно від кількості елементів та схеми їх з'єднання.

Алгоритм визначення НО побудований на підставі ряду аксіом та пристосований для розрізнення схем за надійністю у випадку рівнонадійних та абсолютно надійних елементів.

Розподільні електричні мережі мають складну конфігурацію та структуру. Параметричні оцінки надійності різних схем електропостачання споживачів для таких електричних мереж дуже близькі за величиною (відміна не більша за похибку). Тобто, непараметрична оцінка, у першу чергу, використовується для розподільних електричних мереж та схем електропостачання.

Розглянемо основні аксіоми визначення НО:

1. Параметр НО схеми електропостачання кожного споживача визначається згідно з розрахунковою схемою з'єднання елементів мережі відносно цього споживача. Чим надійніша схема, тим більше значення НО.

2. Якщо розрахункова схема містить один елемент, то НО такої схеми дорівнює НО цього елемента.

3. У разі послідовного з'єднання елементів розрахункової схеми НО ділянки зменшується обернено пропорційно до кількості елементів. Наприклад, якщо НО кожного з послідовних елементів схеми дорівнює

одиниці, то для двох послідовно з'єднаних елементів  $НО = \frac{1}{2}$ , для трьох –

$НО = \frac{1}{3}$  і так далі; Якщо  $n$  послідовно з'єднаних елементів мають різні

значення НО, то для всієї ланки (рис. 5.1):

$$НО = \left[ \sum_{i=1}^n (НО_i)^{-1} \right]^{-1}. \quad (5.1)$$

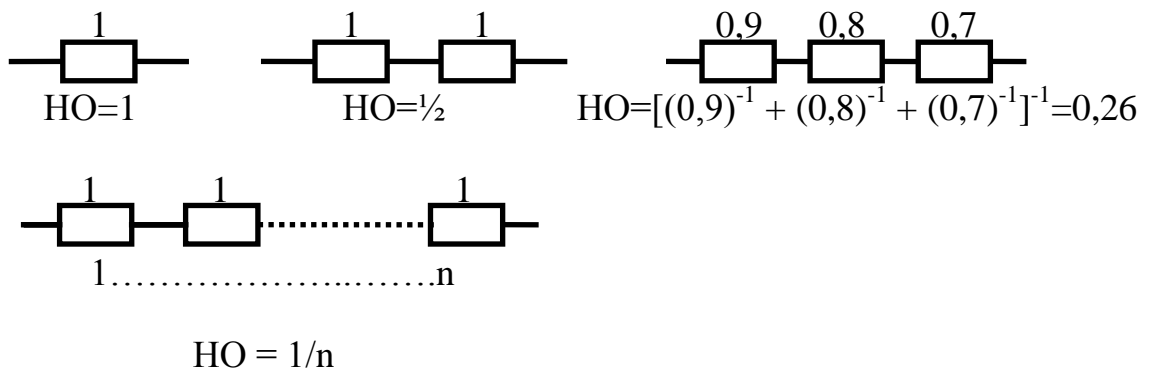


Рис. 5.1 – Визначення НО для схеми, що складається з одного елемента чи декількох послідовно з'єднаних елементів

4. У разі паралельного з'єднання елементів НО еквівалентної схеми дорівнює сумі НО всіх елементів (рис. 5.2), тобто аналогічно обчисленню суми провідностей електричного кола:

$$НО = \sum_{i=1}^m НО_i. \quad (5.2)$$

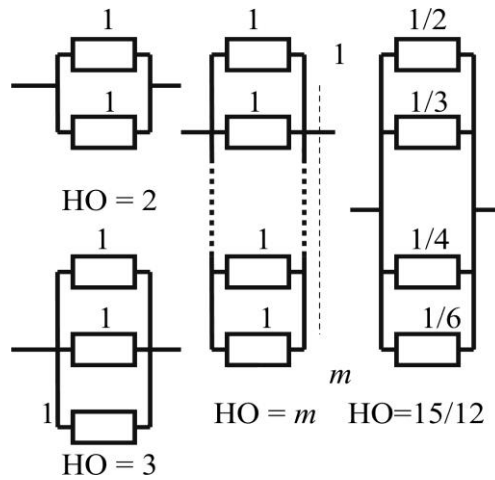
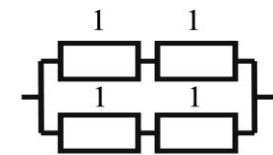
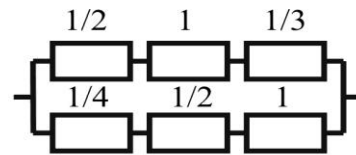


Рис. 5.2 – Визначення НО для схеми,  
що складається з паралельно з'єднаних елементів

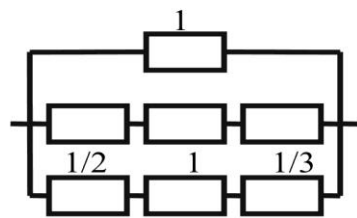
5. У разі паралельного з'єднання  $m$  ділянок, кожна з яких, своєю чергою, складається з декількох послідовних елементів (рис. 5.3), НО еквівалентної схеми розраховують відповідно до аксіом 3 та 4.



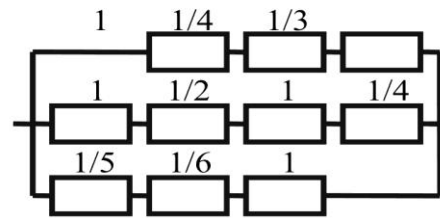
$$HO = 1/2 + 1/2 = 1$$



$$HO = 1/6 + 1/7 = 13/42$$



$$HO = 1 + 1/4 + 1/6 = 17/12$$

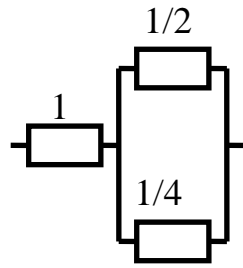


$$HO = 1/12 + 1/8 + 1/8 = 1/3$$

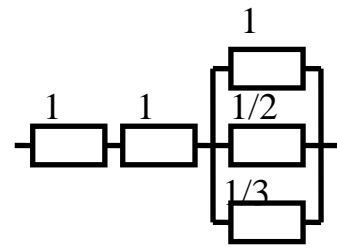
Рис. 5.3 – Визначення НО для схеми, що складається з паралельних ділянок

6. У разі послідовного з'єднання декількох елементів з групою паралельно з'єднаних елементів, НО знаходять аналогічно до визначення провідностей електричного кола (рис. 5.4):

$$HO = \left[ \sum_{i=1}^n HO_i^{-1} + \left( \sum_{j=1}^m HO_j \right)^{-1} \right]^{-1}. \quad (5.3)$$



$$\text{НО} = (1 + 4/3)^{-1} = 3/7$$



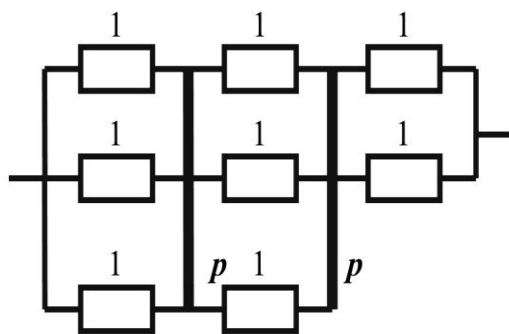
$$\text{НО} = (1 + 1 + 6/11)^{-1} = 11/28$$

Рис. 5.4 – Визначення НО для схеми, що складається з паралельно-послідовно з'єднаних елементів

7. У разі, якщо паралельні ланки з'єднано абсолютно надійними перемичками, НО обчислюють відповідно до аксіом 3 та 4 з урахуванням коефіцієнта  $\frac{p}{n_{\text{сер}}}$ , де  $p$  – кількість перемичок, а  $n_{\text{сер}}$  – середня кількість елементів у паралельних ланках (рис. 5.5):

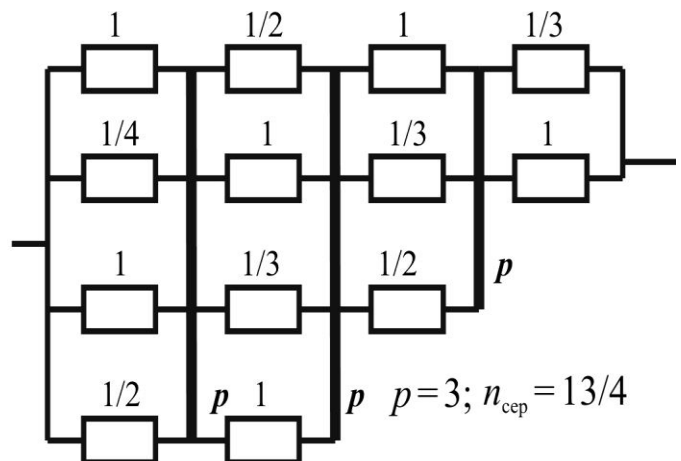
$$\text{НО} = \sum_{j=1}^m \text{НО}_j + \frac{p}{n_{\text{сер}}}; \quad (5.4)$$

$$n_{\text{сер}} = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n n_i. \quad (5.5)$$



$$p = 2; n_{\text{сер}} = (3 + 3 + 2)/3 = 8/3;$$

$$\text{НО} = 1/3 + 1/3 + 1/2 + 6/8 = 2,41$$



$$\text{НО} = 1/7 + 1/9 + 1/6 + 1/3 + 12/13 = 1,67$$

Рис. 5.5 – Визначення НО для схеми, що складається з паралельних груп рівнонадійних елементів

## 5.2 Зміст контрольної роботи та приклад розрахунку

Контрольна робота складається з двох частин.

**1 частина.** Непараметрична оцінка надійності фрагментів систем електропостачання.

Для заданих фрагментів систем електропостачання (рис. 5.6) виконати непараметричну оцінку надійності. Варіанти даних для розрахунку наведено в табл. 5.1.

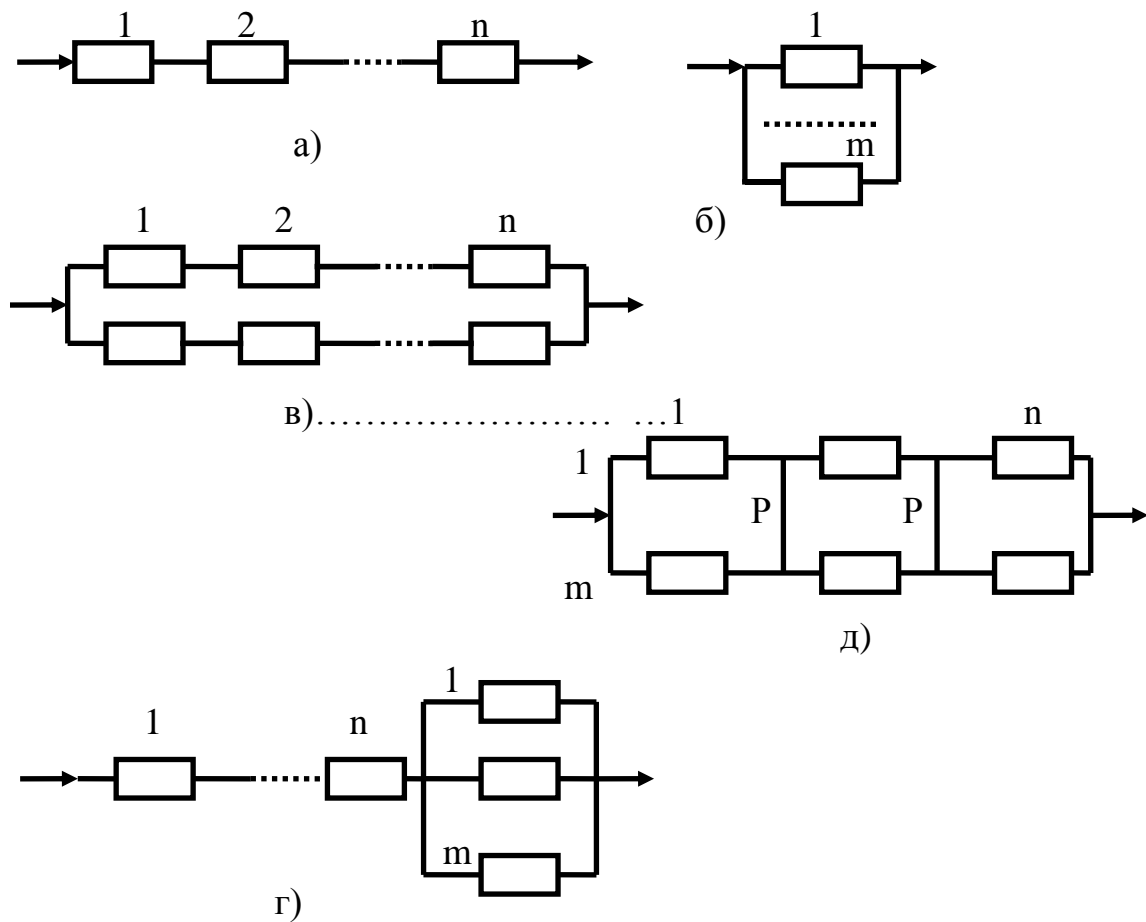


Рис. 5.6 – Приклади фрагментів систем електропостачання

**Варіанти даних для розрахунку 1-ї частини контрольної роботи**

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Рис. 5.6, а. Кількість послід. елементів <b>n</b>	15	20	20	15	20	25	17	27	23	20
Рис. 5.6, б. Кількість парал. елементів <b>m</b>	12	18	20	23	21	17	16	14	18	13
Рис. 5.6, в. Кількість послід. елементів <b>n</b>	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Рис. 5.6, в. Кількість парал. ланцюгів <b>m</b>	4	3	5	3	2	4	5	3	4	2
Рис. 5.6, г. Кількість послід. елементів <b>n</b>	7	4	6	9	8	5	3	10	9	10
Рис. 5.6, г. Кількість парал. елементів <b>m</b>	4	5	7	6	9	8	10	12	11	13
Рис. 5.6, д. Кількість послід. елементів <b>n</b>	7	6	4	8	7	9	4	8	9	6
Рис. 5.6, д. Кількість парал. ланцюгів <b>m</b>	5	4	6	7	8	9	12	11	10	9

Кількість перемичок **p** на рис. 5.6, д визначається згідно схеми для кожного варіанта.

Значення параметра НО для кожного з **n** послідовних елементів у ланцюгу визначається як:  $НО_n = 1 - 0,02n$ .

Значення НО для кожного з **m** паралельних елементів (рис. 5.6, б та рис. 5.6, г) визначається як:  $НО_m = 1 - 0,01m$ .

**2 частина.** Непараметрична оцінка надійності живлення електроспоживачів у системах електропостачання.

Для заданої загальної схеми електропостачання (рис. 5.7) скласти розрахункову схему (згідно обраного варіанта) та виконати непараметричну оцінку надійності живлення електроспоживачів у точках 1, 2, 3 та 4.

Варіанти даних для розрахунку наведено в табл. 5.2.

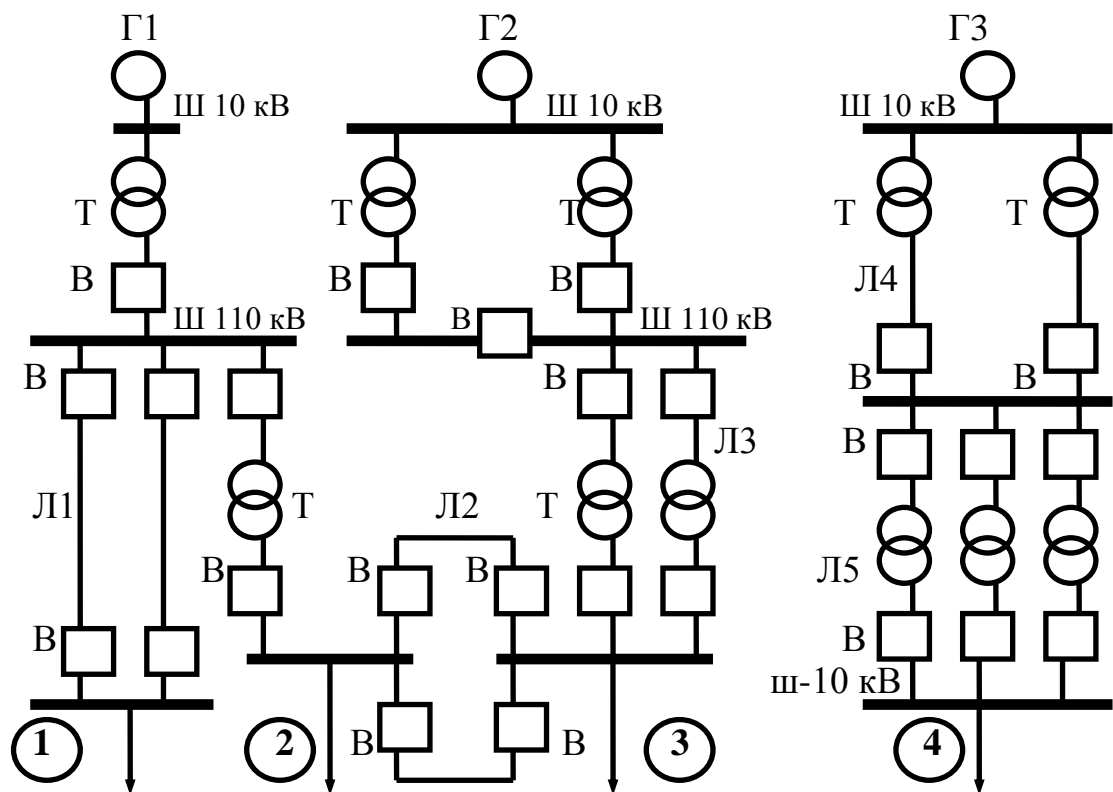


Рис. 5.7 – Загальна схема системи електропостачання

Таблиця 5.2

**Варіанти даних для розрахунку 2-ї частини роботи**

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кількість ланцюгів										
Л1	3	1	2	1	2	3	2	2	3	1
Л2	1	2	2	2	1	1	2	1	2	2
Л3	2	3	1	3	1	3	3	2	1	3
Л4	4	4	3	2	3	2	2	3	2	1
Л5	3	2	1	3	2	2	1	1	3	2

На схемі рис. 5.7 показник НО генераторів Г та вимикачів В прийнято таким, що дорівнює 1, а показник НО для трансформаторів Т та ліній Л прийнято таким, що дорівнює 0,75

З метою спрощення характеристики надійності шин РП підстанцій під час виконання непараметричної оцінки схем не враховуються, а живлення споживача 1 від генератора Г2 у режимі зворотної трансформації не передбачено.

### Приклад розрахунку

Визначити НО для системи електропостачання, загальну схему якої наведено на рис. 5.7.

Відповідно до рис. 5.7 за  $L1 = 2$ ;  $L2 = 1$ ;  $L3 = 2$ ;  $L4 = 3$  та  $L5 = 1$  складемо еквівалентні розрахункові схеми (рис. 5.8).

Визначаємо НО для складених схем електропостачання споживачів у точках 1, 2, 3 та 4 з урахуванням того, що показник НО для генераторів Г та вимикачів В прийнято таким, що дорівнює 1, а показник НО для трансформаторів Т та ліній Л прийнято таким, що дорівнює 0,75.

$$НО_1 = [(2(1 + (0,75)^{-1} + 1)^{-1})^{-1} + 1 + (0,75)^{-1} + 1]^{-1} = 0,2.$$

Параметр  $НО_2$  визначатимемо послідовно. Спочатку визначимо  $НО_H$  нижньої ділянки (за винятком генератора Г2):

$$НО_H = [1 + (0,75)^{-1} + 1 + [2(1 + (0,75)^{-1} + (0,75)^{-1} + 1)^{-1}]^{-1} + ((1 + 1 + (0,75)^{-1})^{-1} + (1 + (0,75)^{-1})^{-1})^{-1}]^{-1} = 0,142.$$

Визначаємо  $НО_B$  верхньої (з урахуванням Г1) ділянки:

$$НО_B = [1 + (0,75)^{-1} + 1 + 1 + (0,75)^{-1} + 1]^{-1} = 0,15.$$

Визначаємо сукупне значення  $НО_2$  як паралельне з'єднання верхньої та нижньої (з урахуванням Г2) ділянок:

$$НО_2 = 0,15 + [(0,142)^{-1} + 1]^{-1} = 0,274.$$

Аналогічно обчислюємо параметр  $НО_3$ :

$НО_H$  нижньої ділянки:

$$НО_H = [(2(1 + (0,75)^{-1} + (0,75)^{-1} + 1)^{-1})^{-1} + ((1 + 1 + (0,75)^{-1})^{-1} + (1 + (0,75)^{-1})^{-1})^{-1}]^{-1} = 0,27;$$

$НО_B$  верхньої ділянки:

$$НО_B = [1 + (0,75)^{-1} + 1 + 1 + (0,75)^{-1} + 1 + 1 + (0,75)^{-1} + 1]^{-1} = 0,1;$$

Сукупне значення  $НО_3$  ділянок:

$$НО_3 = 0,1 + [(0,274)^{-1} + 1]^{-1} = 0,315.$$



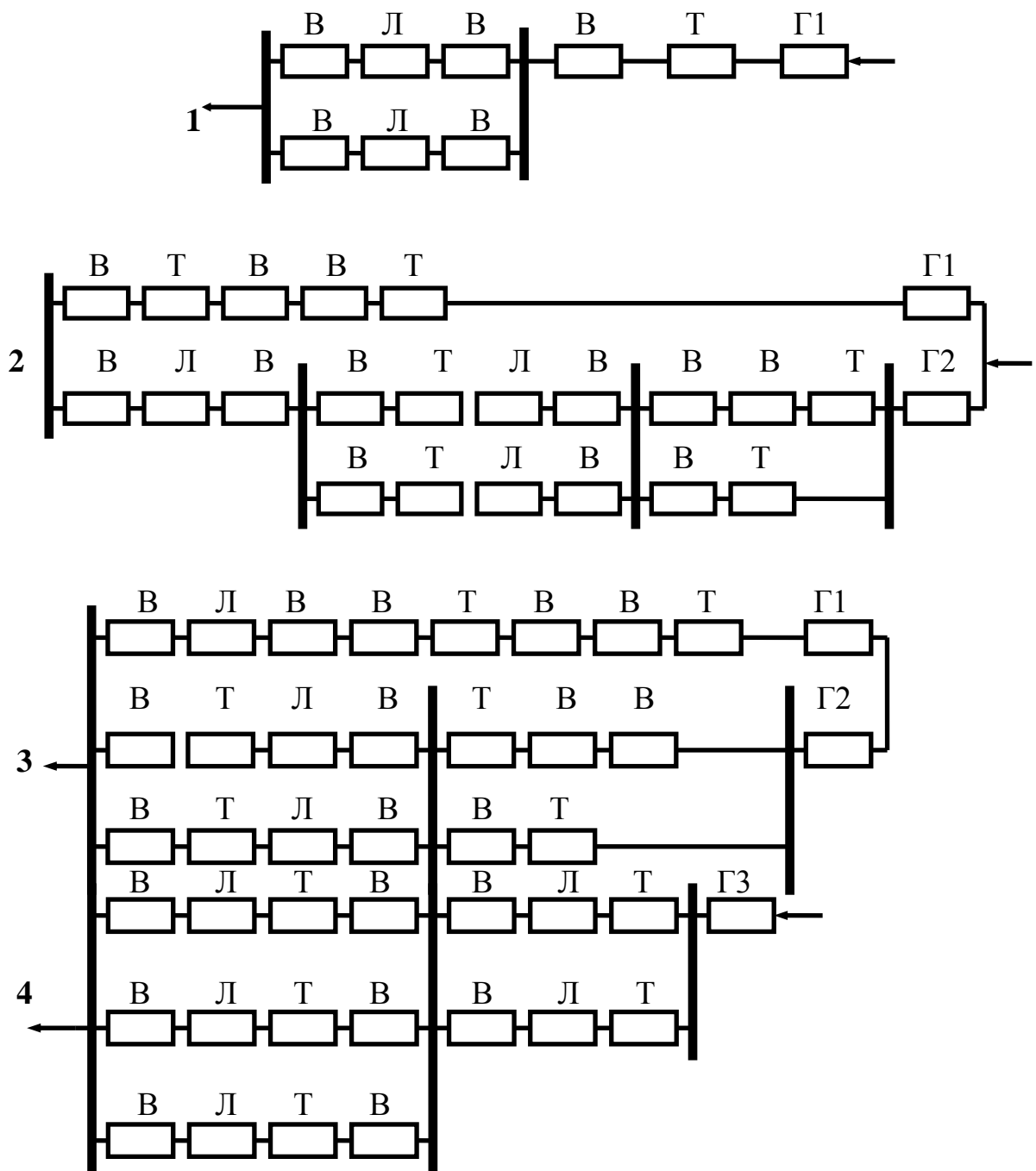


Рис. 5.8 – Еквівалентні розрахункові схеми

Розраховуємо параметр  $HO_4$  як послідовне з'єднання ділянок, які, своєю чергою, складаються з декількох паралельних ланок:

$$HO_4 = [1 + (0,75)^{-1} + (0,75)^{-1} + 1 + [3(1 + (0,75)^{-1} + (0,75)^{-1})^{-1} + 1]^{-1}]^{-1} = 0,145.$$

Отже, найнадійнішою схемою є така, яка має вище значення  $HO$ , тобто схема, для якої  $HO_4 = 0,315$ .

## **Запитання для самоперевірки**

1. Що таке «непараметричне оцінювання» надійності систем електропостачання?
2. Наведіть та обґрунтуйте сферу застосування методу непараметричного оцінювання надійності.
3. Наведіть аксіоми непараметричного оцінювання надійності.
4. Яка послідовність складання розрахункової схеми?
5. Як розраховується НО для ланцюга із послідовно з'єднаних елементів?
6. Як розраховується НО для ланцюга із паралельно з'єднаних елементів?

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Казанський С.В., Матеєнко Ю.П., Сердюк Б.М. Надійність електроенергетичних систем: навчальний посібник / С.В. Казанський, Ю.П. Матеєнко, Б.М. Сердюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2011.–216 с. – ISBN 978-966-622-453-1.
2. Журахівський А.В. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник / А.В. Журахівський, С.В. Казанський, Ю.П. Матеєнко, О.Р. Пастух. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 456 с. – Бібліогр.: с. 450-452. – ISBN 978-966-622-862-1.
3. Журахівський А.В., Кінаш Б.М., Пастух О.Р. Надійність електричних систем і мереж: навчальний посібник. / А.В. Журахівський, Б.М. Кінаш, О.Р. Пастух. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 280 с. – ISBN 978-617-607-293-5.
4. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення: Видання офіційне. – К.: Держстандарт України, 1995. – 92 с.
5. СОУ-Н МЕВ-40.1-00100227-68:2012 Стійкість енергосистем. Керівні вказівки [Текст]. Затв. Наказом Міненерговугілля України від 23.07.2012 р. № 539. – К.: НТЦЕ НЕК «Укренерго», 2012. – 38 с.
6. Зорін Є.В., Казанський С.В., Олефір Д.О. Забезпечення надійної робо-ти ОЕС України – нагальна потреба сучасності / Електропанорама. – № 4, 7-8, – 2007.
7. Казанський С.В. Забезпечення надійності електропостачання в умовах енергоринку / Електропанорама. – № 9. – 2009.
8. Казанский С.В., Матеенко Ю.П., Лунин А.С. Расчет надежности структурных схем электрических станций в условиях функционирования рынка электрической энергии [Текст] / Энергетика: економіка, технології, екологія // Міжфак. наук. видання, – К.: НТУУ КПІ, 2015, № 3.